UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DOS EFEITOS DA POLARIDADE NA SOLDAGEM COM CORRENTE CONTÍNUA E ALTERNADA PELOS PROCESSOS TIG E MIG/MAG

Dissertação submetida à
UNIVESIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
para a obtenção do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUCIANO MACHADO CIRINO

Florianópolis, Fevereiro de 2009.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DOS EFEITOS DA POLARIDADE NA SOLDAGEM COM CORRENTE CONTÍNUA E ALTERNADA PELOS PROCESSOS TIG E MIG/MAG

LUCIANO MACHADO CIRINO

Esta dissertação foi julgada e adequada para obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA
Sendo aprovada em sua forma final

_____

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr.Eng. – Orientador

_____

Prof. Eduardo Alberto Fancello, D.Sc. – Coordenador do curso

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Carlos Enrique Niño Bohórquez, Dr.Eng.

_____

Prof. Carlos Eduardo Iconomos Baixo, Dr.Eng.

_____

Prof. Américo Scotti, Ph.D.

_____

Raul Gohr Júnior, Dr. Eng.

“...cada um é filho de suas obras.”

(Dom Quixote) - Miguel de Cervantes

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Neri e Teresinha e meu irmão, Juliano, e toda a minha família pelo apoio incondicional.

Ao Prof. Jair Carlos Dutra, pela orientação e pela oportunidade de fazer parte da equipe do LABSOLDA.

Ao Eng. Guilherme Locatelli, ao Designer Marcelo Okuyama, ao Tecnólogo Renon Steinbach, a Tecnóloga Tiara Pimentel, ao Fis. Tiago Vieira e a Márcia Paula Thiel.

Ao Eng. Túlio Fernandes dos Santos pela paciência e os ensinamentos durante o início deste trabalho.

A Ricardo Campagnin pelo suporte técnico e pela amizade e aos bolsistas Helington Direne, Ivan Olszanski Pigozzo, Ezequiel Gonçalves e Matheus Baranceli pela amizade e ajuda durante os experimentos.

Ao Professores Carlos Niño e Carlos Baixo pela amizade e pela ajuda na conclusão deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica por proporcionar as condições necessárias para realização deste trabalho.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 1

1.1 OBJETIVOS 3

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 5

2.1 INTRODUÇÃO: ASPECTOS FUNDAMENTAIS DOS PROCESSOS TIG E MIG/MAG 5

2.2 PROCESSO TIG 5

2.2.1 EFEITOS DOS MECANISMOS DE EMISSÃO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO ARCO TIG 11

2.2.2 EFEITOS DA POLARIDADE SOBRE AS DIMENSÕES DO CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO TIG CA 14

2.3 PROCESSO MIG/MAG 18

2.3.1 A INFLUÊNCIA DA POLARIDADE NO PROCESSO MIG/MAG SOBRE A TRANSFERÊNCIA METÁLICA, TAXA DE FUSÃO E AS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO CORDÃO DE SOLDA 19

2.3.2 SISTEMAS MIG/MAG PULSADO CC+ E CA – ASPECTOS FUNDAMENTAIS 26

2.3.3 SOLDAGEM DO ALUMÍNIO COM MIG PULSADO 35

2.3.4 GASES DE PROTEÇÃO EMPREGADOS NA SOLDAGEM MIG DO ALUMÍNIO 36

3 MATERIAIS E MÉTODOS 38

3.1 APARATO EXPERIMENTAL 38

3.1.1 FONTE DE SOLDAGEM 39

3.1.2 SISTEMA AVANÇADO DE CONTROLE 39

3.1.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO PORTÁTIL 41

3.1.4 SISTEMA DE DESLOCAMENTO DE TOCHA 42

3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS 43

3.2.1 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS DO GRUPO 1: INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ATUAÇÃO DA POLARIDADE POSITIVA NA SOLDAGEM TIG CA DO ALUMÍNIO 44

3.2.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS DO GRUPO 2: INFLUÊNCIA DA INTENSIDADE DA CORRENTE POSITIVA NA SOLDAGEM TIG CA DO ALUMÍNIO 46

3.2.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS DO GRUPO 3: INFLUÊNCIA DA POLARIDADE NAS CARACTERÍSTICAS DOS CORDÕES DE SOLDA E NO COMPORTAMENTO DO ARCO NA SOLDAGEM MIG/MAG DE AÇOS AO CARBONO 47

3.2.4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS DO GRUPO 4: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MODALIDADES MIG PULSADO CC+ E CA NA SOLDAGEM DE JUNTAS DE ALUMÍNIO EM FILETE 49

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 52

4.1 INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ATUAÇÃO DA POLARIDADE POSITIVA NA SOLDAGEM TIG CA DO ALUMÍNIO 52
4.1.1 INFLUÊNCIA DE %EP SOBRE A LIMPEZA CATÓDICA 52
4.1.2 INFLUÊNCIA DE %EP SOBRE A TENSÃO E A POTÊNCIA DE ARCO 53
4.1.3 INFLUÊNCIA DE %EP SOBRE A ZONA FUNDIDA 58
4.2 INFLUÊNCIA DA INTENSIDADE DA CORRENTE POSITIVA NA SOLDAGEM TIG CA DO ALUMÍNIO 61
4.2.1 INFLUÊNCIA DE I(+) SOBRE A LIMPEZA CATÓDICA 61
4.2.2 INFLUÊNCIA DE I(+) SOBRE A TENSÃO E A POTÊNCIA DE ARCO 62
4.2.3 INFLUÊNCIA DE I(+) SOBRE A ZONA FUNDIDA 66
4.2.4 COMPARAÇÃO ENTRE O EFEITO DA INTENSIDADE DA CORRENTE POSITIVA E O TEMPO DE ATUAÇÃO DA POLARIDADE POSITIVA SOBRE A ZONA FUNDIDA NA SOLDAGEM TIG CA DO ALUMÍNIO 68
4.3 INFLUÊNCIA DA POLARIDADE NAS CARACTERÍSTICAS DOS CORDÕES DE SOLDA E NO COMPORTAMENTO DO ARCO NA SOLDAGEM MIG/MAG DE AÇOS AO CARBONO 70
4.3.1 ASPECTO SUPERFICIAL DOS CORDÕES DE SOLDA 70
4.3.2 INFLUÊNCIA DA POLARIDADE SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA 72
4.3.3 INFLUÊNCIA DA POLARIDADE SOBRE O COMPORTAMENTO DO ARCO 72
4.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MODALIDADES MIG PULSADO CC+ E CA NA SOLDAGEM AUTOMÁTICA DE JUNTAS DE ALUMÍNIO EM FILETE 74
4.4.1 ESTABILIDADE: OBSERVAÇÃO E ANÁLISE 74
4.4.2 ASPECTO SUPERFICIAL 83
4.4.3 ANÁLISE DA ZONA FUNDIDA 85

5 CONCLUSÕES 88

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 90

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do processo TIG – região do arco. 6
Figura 2 - Principais regiões do arco voltaico [9]. 7
Figura 3 - A1) Área de atuação da mancha anódica sobre a superfície da peça a ser soldada durante a polaridade negativa; A2) Área de atuação da mancha catódica sobre a superfície da peça a ser soldada durante a polaridade positiva. 11
Figura 4 - Curva corrente x tensão (característica estática) do arco TIG para três distâncias eletrodo-peça – 2, 4 e 6 mm. Gás de proteção empregado: Argônio. 11
Figura 5 - Oscilogramas de tensão e corrente característicos de uma soldagem TIG CA do alumínio utilizando uma fonte de soldagem eletromagnética. 13
Figura 6 - Formato de onda retangular para o processo TIG CA (regulada em 50% eletrodo positivo e 50% eletrodo negativo). 14
Figura 7 – Representação comumente encontrada na literatura: a) Processo em CC-, mostrando uma seção transversal de solda estreita e profunda; b) Processo em CA, mostrando uma seção transversal de solda com características intermediarias entre CC- e CC+, já apresentando desgaste no eletrodo; c) Processo em CC+ mostrando uma seção transversal larga e rasa, com grande desgaste de eletrodo [3, 6, 12, 13, 15]. 15
Figura 8 – Resultados de Yarmuch e Patchett [17]: à medida que aumentou o tempo de atuação da polaridade positiva (percentual de eletrodo positivo) aumentou também a penetração. 16
Figura 9 - Representação esquemática do processo MIG/MAG – região do arco [20]. 19
Figura 10 - Imagens da gota metálica sendo repelida e movimentação do ponto catódico [21]. 20
Figura 11 - Valores envolvidos no cálculo da taxa de fusão (Tf): corrente de soldagem (I), comprimento da extensão do eletrodo (L). 21
Figura 12 - (a) Comportamento do arco em CC+ e (b) em CC- 23
Figura 13 - Simulação mostrando o destacamento da gota metálica, transferência no arco, formação e preenchimento da cavidade na poça de fusão e formação de nova gota [27]. 25
Figura 14 - Formato de onda de corrente na condição pulsado CC+. 26
Figura 15 - a) Oscilograma de corrente em modo curto-circuito; b) Oscilograma de tensão em modo curto-circuito; c) Oscilograma de corrente em modo pulsado; d) Oscilograma de tensão em modo pulsado. 28

Figura 16 - Correspondentes aos oscilogramas da Figura 15: a) Aspecto superficial do cordão de solda realizado no modo curto-circuito; b) macrografia correpondente a (a); c) aspecto superficial do cordão de solda realizado no modo pulsado; d) macrografia correspondente a (c).....29
Figura 17 – Formatos de onda de corrente para MIG/MAG Pulsado CA: (a) Formato de onda retangular; (b) Formato de onda trapezoidal. 31
Figura 18 - Escalada do arco voltaico durante a fase negativa [36]. 32
Figura 19 - Tela do Sistema Avançado de Controle com formato de onda de corrente programada para a soldagem do alumínio com MIG Pulsado CA. 32
Figura 20 - Cordões de solda sobre chapas de alumínio 1200, utilizando processo MIG Pulsado CA [36]. 34
Figura 21 - Indício de variação do comprimento de arco: irregularidade na faixa de limpeza catódica ao longo do cordão de solda. 37
Figura 22 - Visão geral da bancada de ensaios. 38
Figura 23 – Fonte de Soldagem Inversal 450/IMC. 39
Figura 24 - Disposição física do SAC [51]. 40
Figura 25 - Principais elementos do SAC. 41
Figura 26 - Sistema de Aquisição Portátil (SAP). 42
Figura 27 - Sistema de deslocamento de Tocha. 43
Figura 28 – Formatos de onda para as condições CC+ e CA. 51
Figura 29- (a) Cordão de solda realizado com %EP = 5,0%; (b) Cordão de solda realizado com %EP = 6,0%; (c) Cordão de solda realizado com %EP = 6,5% e considerado de aparência aceitável. Cordões de solda realizados com velocidade de soldagem de 3,33 mm/s (20 cm/min), corrente de soldagem regulada em 100 A para ambas as polaridades e período de 20 ms.....53
Figura 30 – Aparência de alguns dos cordões de solda realizados durante o ensaio com velocidade de soldagem de 3,33 mm/s (20 cm/min), corrente de soldagem regulada em 100 A para ambas as polaridades e período de 20 ms. 53
Figura 31 - (a) Gráfico da relação entre Tensão Eficaz e Percentual de Eletrodo Positivo (%EP). (b) Gráfico da relação entre Potência Média e Percentual de Eletrodo Positivo (%EP). Referentes a todas as séries de ensaios. 54
Figura 32 - Oscilogramas de tensão correspondentes a cada percentual de eletrodo positivo testado.....55

Figura 33 – Aumento do módulo da tensão com o tempo logo após a transição de negativo para positivo. 56
Figura 34 – Comportamento da Potência Média calculadas separadamente para cada polaridade. 58
Figura 35 – Macrografias das secções transversais correspondentes todas as séries de ensaios realizados com variação de %EP. Velocidade de soldagem de 3,33 mm/s (20 cm/min), corrente de soldagem regulada em 100 A para ambas as polaridades e período de 20 ms. 59
Figura 36 - (a) Relação entre %EP e Profundidade de penetração de solda (mm). (b) Relação entre %EP e Área da zona fundida (mm²). 60
Figura 37 - Aparência dos cordões de solda realizados durante os ensaios. Velocidade de soldagem de 3,33 mm/s (20 cm/min) e tempos de duração da polaridade negativa e positiva mantidos constantes em 10 ms cada um. 61
Figura 38 – (a) Relação entre Tensão Eficaz e Corrente Positiva. (b) Relação entre Potência Média e Corrente Positiva. 63
Figura 39 – Oscilogramas de tensão correspondentes a cada par I(+) / I(-) testado....64
Figura 40 – Comportamento da Potência Média durante as fases positivas e negativas....65
Figura 41 – Macrografias correspondentes a todas as séries de ensaios. Velocidade de soldagem de 3,33 mm/s (20 cm/min) e tempos de duração da polaridade negativa e positiva mantidos constantes em 10 ms cada um. 66
Figura 42 – (a) Relação entre Corrente Positiva e penetração de solda (mm). (b) Relação entre Corrente Positiva e Área da zona fundida (mm²). 67
Figura 43 - Relação entre $\%EP_{eqv}$ e Área da Zona Fundida: comparação direta entre os dois experimentos. 69
Figura 44 - Aparência superficial dos cordões de solda para as condições (a), (b) e (c). 71
Figura 45 - Macrografias referentes aos ensaios (a), (b) e (c). 72
Figura 46 - Fotografias do arco voltaico em CC+ e em CC-. Realizadas nas mesmas condições de soldagem dos ensaios. 73
Figura 47 – Diagramas tensão-corrente para dois ensaios realizados na mesma condição mostram situações de (a, b) boa regularidade e (c,d) razoável regularidade com presença de curtos-circuitos. Gás de proteção empregado: 75%Ar + 25% He. 77
Figura 48 – Distribuição dos valores de tensão para a fase de base e pulso no para MIG Pulsado CC+. 79

Figura 49 – Distribuição dos valores de tensão para as fases de pulso, base e base negativa no processo MIG Pulsado CA. 81
Figura 50 – Diagramas tensão-corrente para o processo MIG Pulsado CA. 82
Figura 51 - Aspecto superficial característico dos cordões de solda obtidos. 84
Figura 52 - Macrografias referentes a condição pulsado CC+. 86
Figura 53 - Macrografias referentes a condição pulsado CA. 87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de Fusão para cada polaridade para arames de aço e alumínio. 34
Tabela 2 - Parâmetros de soldagem para os ensaios variando o Percentual de Eletrodo Positivo (%EP).....44
Tabela 3 – Composição Química Nominal do Alumínio 1200 [55].....45
Tabela 4 – Parâmetros de soldagem para os ensaios variando as Intensidades de Corrente Negativa e Positiva. 46
Tabela 5 - Parâmetros de soldagem para os ensaios realizados em diferentes condições de polaridade e velocidade de soldagem. 48
Tabela 6 - Condições de soldagem para o ensaio do Grupo 4.....50
Tabela 7 - Tensões Médias calculadas separadamente para as polaridades negativa e positiva. 57
Tabela 8 - Tensões Médias calculadas separadamente para as polaridades negativa e positiva. 64
Tabela 9 - Conversão dos valores de corrente (positiva e negativa) para $\%EP_{eqv}$.....69

SIMBOLOGIA

%EN: Percentual de eletrodo negativo

%EP: Percentual de eletrodo positivo

A: Constante característica do eletrodo (Equação de Richardson-Dushman)

Ar: Argônio

CA: Corrente alternada

CC-: Corrente continua e eletrodo conectado ao pólo negativo

CC+: Corrente continua e eletrodo conectado ao pólo positivo

CO_2: Dióxido de carbono

DBCP: Distância Bico-de-Contato Peça

de: Diâmetro do eletrodo

DEP: Distância Eletrodo-Peça

Ha: Calor gerado no ânodo

He: Hélio

I_i : Corrente no instante *i*

I(-): Intensidade da corrente negativa

I(+): Intensidade da corrente positiva

Ib: Corrente de base

Ief: Corrente eficaz

Im: Corrente Média

Im_a : Corrente média absoluta

In: Corrente de base negativa

Ip: Corrente de pulso

J ou j: Densidade de corrente

j_i : Densidade de corrente carregada por ions

j_e : Densidade de corrente carregada por elétrons

K(-): Coeficiente de fusão negativo

K(+): Coeficiente de fusão positivo

K: Coeficiente de fusão

k: Constante de Boltzman

L: Extensão do eletrodo

MIG/MAG: Metal Inert Gas / Metal Active Gas

n: Número de pontos capturados pelo sistema

O_2: Oxigênio

Pm: Potência média

R^2: Coeficiente de determinação

SAC: Sistema Avançado de Controle

SAP: Sistema de Aquisição Portátil

t(-): tempo de polaridade negativa

t(+): tempo de polaridade positiva

T: Período

T: Temperatura na superfície do cátodo

tb: Tempo de base

Tf: Taxa de Fusão

Tf: Taxa de Fusão

TIG: Tungsten Inert Gas

tn: tempo de base negativa

tp: Tempo de pulso

U_i : Tensão no instante *i*

Uef: Tensão Eficaz

UGPP: Uma Gota Por Pulso

V_a : Queda de tensão anódica

V_c : Queda de tensão catódica

Va: Velocidade de alimentação de arame

Vs: Velocidade de soldagem

W: Tungstênio

α: Constante relacionada ao calor gerado por fenômenos no arco

β: Constante dependente do diâmetro e resistividade do arame-eletrodo

ϕ : Função-trabalho do material

RESUMO

Este trabalho abrange o estudo do efeito da polaridade sobre alguns aspectos da soldagem com os processos TIG e MIG/MAG. Os experimentos foram agrupados conforme o processo de soldagem e o aspecto a ser estudado, bem como do procedimento experimental empregado. O primeiro grupo de experimentos visou analisar o efeito do tempo de duração da polaridade positiva sobre as dimensões dos cordões de solda, limpeza catódica e comportamento da tensão no processo TIG CA com formato de onda retangular aplicado ao alumínio. No aspecto dimensões do cordão de solda, os resultados mostraram situações onde um aumento na penetração de solda e nas áreas fundidas foi verificado à medida que maiores tempos de polaridade positiva eram aplicados. Este comportamento difere do que é comumente encontrado na literatura corrente sobre processos de soldagem com eletrodos não-consumíveis, que infere uma diminuição na penetração de solda com o aumento do tempo de atuação da polaridade positiva. O segundo grupo verificou o efeito da intensidade da corrente positiva no mesmo processo. Os resultados também se mostraram distintos ao que é comumente apresentado na literatura corrente, que sugere que a intensidade da corrente durante a polaridade positiva tem um papel menor na capacidade de fusão do processo TIG CA aplicado ao alumínio, sendo apenas efetiva para a realização da remoção de óxidos. O aumento da intensidade de corrente positiva causou um aumento de penetração de solda e área fundida. No terceiro grupo de experimentos, foram investigados aspectos concernentes à influência da polaridade no processo MIG/MAG. A maior parte das informações divulgadas na literatura se confirmou. No entanto, características associadas à condição CC- (polaridade negativa) como repulsão de gota e geração de respingos não foram constatadas pela observação do arco voltaico e análise dos cordões de solda. Isto pode ter sido motivado pela corrente utilizada (260 A), típica de transferência goticular, associada à utilização de um mistura de Ar + 2% O_2, o que permitiu uma soldagem satisfatoriamente estável em ambas as polaridades. No último grupo, experimentos foram realizados para avaliar o desempenho do sistema MIG Pulsado na condição CC+ e CA na soldagem de juntas de alumínio em filete. Uma mistura especial de Ar + 0,2% O_2 foi testada durante estes ensaios para a condição CC+. A expectativa estava em minimizar a oscilação de comprimento de arco que ocorre durante a soldagem MIG do alumínio. Porém, o resultado não foi atingido conforme o esperado. Uma melhoria foi notada, mas de forma bastante limitada e longe da condição ideal. Na condição CA, o processo mostrou-se mais estável para este tipo de aplicação, porém, problemas de falta de robustez (baixa repetividade) foram constatados para as duas variantes deste processo.

Palavras-Chave: TIG, MIG/MAG, Polaridade do Arco, Efeito de Campo, Estabilidade, Alumínio

ABSTRACT

This is a study regarding the effect of the polarity on some aspects of the GTAW and GMAW processes. The experiments were grouped according to the welding process and the aspect to be studied as well as the experimental procedure used. The first group of experiments aimed to analyze the effect of positive polarity time on the weld bead dimensions, cathodic cleaning and voltage behavior in the square current wave form AC-GTAW process applied to aluminum. In the weld bead dimensions aspect, the results showed situations where there was an increase in the weld depth and fusion areas with the increase of positive polarity time. This behavior is different from which is commonly found in the traditional literature about welding processes with non-consumable electrodes, which suggests a decrease in the weld depth with the increase in the positive polarity time. The second group verified the effect of positive polarity current intensity in the same welding process. The results also showed differences from which is commonly presented in the traditional literature, which suggests that the positive polarity current intensity has a minor role in the AC-GTAW process melting capacity when applied to aluminum, being only effective on the cathodic cleaning. The increase in the positive polarity current intensity caused an increase in the weld depth and fusion areas. In the third group of experiments, aspects concerning the effect in the GMAW process were investigated. The majority of the information provided by the literature was confirmed. However, characteristics related to the use of DCEN condition such as drop repulsion were not noticed. This can be attributed to the use of a welding current typical of spray transfer mode (260 A) and the use of Ar + 2% O_2 as shielding gas, which allowed a satisfactorily stable welding in both polarities. In the last group, experiments were carried out to evaluate the performance of the P-GMAW in the DCEP and AC conditions when applied to aluminum fillet joints. A special mixture of Ar + 0.2% O_2 was tested as shielding gas, in the DCEN condition. The result expected was to minimize the arc length oscillation that occurs during the GMAW of aluminum. However, this result was not achieved in the way expected. The AC-GMAW showed itself more stable in this type of application; however, some problems related to the process capacity of duplicate results were noticed in this condition and in the DCEP condition.

Key-words: GTAW, GMAW, Arc Polarity, Field Emission, Stability, Aluminum

CAPÍTULO 1

Introdução

Inúmeros estudos vêm sendo realizados sobre os processos de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) e MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas*). Isto, provavelmente vem acontecendo desde que, na primeira metade do Século XX, estes processos atingiram um grau de desenvolvimento que os tornaram viáveis para uso industrial. Desde então, a necessidade de conhecer as nuances de cada processo se tornaram fundamentais para aprimorá-los e extrair o máximo de produtividade.

No processo TIG, por exemplo, deixou-se de utilizar exclusivamente o hélio e passou-se a empregar o argônio como gás de proteção devido ao menor custo. Inserido neste contexto, algo semelhante aconteceu com o processo MIG/MAG, que inicialmente utilizava apenas gases inertes e mais tarde passou para a utilização do gás ativo dióxido de carbono (CO_2). Atualmente, para soldagem MIG/MAG, são utilizadas misturas binárias e ternárias de gases inertes com ativos.

A evolução dos componentes eletrônicos a partir da década de 1960 impulsionou o desenvolvimento de fontes de soldagem capazes de manipular variáveis de processo de maneira nunca antes vista, como por exemplo, a corrente de soldagem. Isto permitiu (e ainda permite) que soluções inteligentes fossem desenvolvidas na área de soldagem a arco. Talvez o exemplo mais representativo deste tipo de desenvolvimento, sejam os sistemas TIG e MIG/MAG com pulsação de corrente, destinados a superar limitações encontradas quando da utilização de fontes eletromagnéticas e melhorar a qualidade das soldas resultantes.

Com a mesma motivação de compreender melhor estes processos de soldagem, também são realizados pesquisas que abordam a questão do efeito da polaridade sobre seus mais diversos aspectos. No entanto, quando o estudo se limita unicamente ao processo TIG e a influência da polaridade sobre as características geométricas dos cordões de solda (área fundida, largura e penetração de solda) as opções são realmente limitadas. O que quase sempre se encontra é uma visão tradicional, bastante genérica e com pouca ou nenhuma fundamentação em dados experimentais. Esta visão ou entendimento tradicional sobre a

questão da polaridade no processo TIG, é de que, independentemente do material a ser soldado, o processo em CC- (corrente contínua e eletrodo conectado ao terminal negativo da fonte) gerará maior calor na peça e resultará em um cordão de solda esbelto e profundo, desprezando o fato de que o uso de CC+ pode ser muito limitado ou inviável na prática.

Para os metais ferrosos a soldagem TIG é realizada em polaridade negativa, não havendo nenhuma necessidade de utilizar outra polaridade ou variação de polaridade. A situação muda quando o processo TIG é aplicado a metais como o alumínio. Neste caso, há uma exigência pelo uso de corrente alternada (CA) surgida da necessidade de se remover a camada de óxido resistente presente na superfície de peças deste metal, fenômeno que ocorre durante a soldagem e é promovido na fase de polaridade positiva. O entendimento tradicional leva a crer que esta seria a única função da polaridade positiva e que a fusão do metal de base seria realizada preponderantemente pela fase de polaridade negativa.

Esta idéia se manteve sem contestação até 1998, quando o trabalho de Fuerschbach [1] apresentou resultados que contradiziam este entendimento tradicional. Utilizando uma fonte eletrônica de soldagem que lhe permitiu manipular com liberdade os parâmetros do processo TIG CA, este pesquisador relatou situações em que, aumentando a intensidade de corrente durante as fases positivas e a duração destas, se tem aumento de penetração e área fundida.

No caso do processo MIG/MAG, há maior variedade de trabalhos abordando a questão da polaridade. O mais citado foi escrito por Lesnewich [2] e data de 1958. Um dos aspectos discutidos neste trabalho foi a influência da polaridade sobre a taxa de fusão de metal de adição (arame-eletrodo), sempre maior na polaridade negativa. Apesar disto ser uma característica vantajosa na maioria das aplicações, a utilização do eletrodo conectado ao pólo negativo está associada também à formação de elevado nível de respingos e instabilidade de arco. Desta forma, normalmente se solda na condição CC+.

Outra característica deste processo quando trabalhando na condição CC-, é que os cordões de solda resultante têm menor molhabilidade e menor penetração, quando comparados com outros cordões realizados na condição CC+. Isto pode ser vantajoso em uma situação que se deseja menor penetração, como na soldagem de revestimentos, por exemplo. Isto é um fato, tanto que um sistema MIG/MAG Pulsado com corrente alternada foi desenvolvido

recentemente, com o intuito de resolver problemas como este, ou seja, executar soldas em aplicações na qual um menor aporte de calor à peça é desejável.

A proposta deste trabalho é contribuir para um melhor entendimento dos processos de soldagem TIG e MIG/MAG no que diz respeito à questão de polaridade. Foram abordadas questões de ordem dinâmica devido às alternâncias de polaridade em regime, isto é, quando do uso de corrente alternada (CA) e do uso de corrente contínua em ambas as polaridades (CC+ e CC-). O foco principal esteve em verificar as implicações nas soldas resultantes e as informações fornecidas pela literatura em comparação com os resultados obtidos, especialmente no caso do processo TIG.

1.1 Objetivos

Pelo fato de a questão da polaridade no processo TIG e seus efeitos sobre as dimensões da zona fundida ter sido a questão motivadora deste trabalho, atenção especial foi dada ao estudo deste processo na soldagem do alumínio. Buscou-se verificar por intermédio de experimentos qual conceito está mais próximo da realidade: se o entendimento tradicional ou os novos conceitos mostrados em artigos mais recentes, como o de Fuerschbach [1].

Sendo assim, os objetivos relacionados ao estudo do processo TIG foram: verificar os efeitos do tempo de polaridade positiva e intensidade da corrente na polaridade positiva na soldagem TIG CA do alumínio sobre os aspectos limpeza catódica, dimensões da zona fundida e tensão e potência do arco.

Experimentos com o processo MIG/MAG Convencional nas condições CC+ e CC- tiveram como intuito, verificar a influência da polaridade sobre as dimensões da zona fundida, aparência superficial dos cordões de solda e sobre comportamento do arco voltaico. Também foram abordadas questões como taxa de fusão e geração de respingos e o efeito do gás de proteção sobre a estabilidade do processo em CC-.

Como último objetivo, buscou-se avaliar o desempenho do processo MIG Pulsado, nas condições CC+ e CA, na soldagem de juntas de alumínio em filete, utilizando diferentes gases de proteção. Neste caso, o foco principal não está no cordão de solda gerado e sim na

estabilidade e regularidade do processo. Contudo, uma avaliação dos cordões de solda gerados por cada combinação variante de processo / gás de proteção também foi realizada.

CAPÍTULO 2

Fundamentação Teórica

2.1 Introdução: Aspectos fundamentais dos processos TIG e MIG/MAG

O objetivo deste item é mostrar um panorama dos processos TIG e MIG/MAG e, à medida que o texto avança, algumas suposições focando a questão da polaridade que podem ser aplicadas aos dois processos, serão discutidas.

2.2 Processo TIG

O processo TIG se caracteriza por um arco voltaico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio (Figura 1), dito não-consumível, e a peça a ser soldada, que em alguns casos permite a soldagem de chapas metálicas finas (abaixo de 3 mm) sem utilização de metal de adição. Um fluxo de gás inerte protege o eletrodo de tungstênio (W) e a poça de fusão da oxidação e ao ser ionizado fornece um caminho condutor (plasma) para a corrente elétrica [3]. Este processo é capaz de produzir soldas de alta qualidade em quase todos os metais. Metais ferrosos, tais como o aço inoxidável, são soldados na condição CC- (corrente contínua e eletrodo ligado ao terminal negativo da fonte). Nesta condição, a corrente é conduzida através do plasma, parcialmente por íons e principalmente por elétrons que são emitidos pelo cátodo de tungstênio [4].

No caso de alguns metais, como o alumínio, o emprego da condição CC- não trará bons resultados. O aspecto mais relevante, e que torna necessário o emprego de recursos diferenciados para a soldagem TIG do alumínio, é uma camada microscópica de óxido do mesmo metal (Al_2O_3) que se forma sobre sua superfície e que, se danificada, rapidamente se reconstitui na maioria dos ambientes [5]. Esta camada de óxidos garante ao alumínio boa resistência a corrosão, porém se constitui na principal dificuldade da soldagem a arco do alumínio e suas ligas.

A barreira de óxidos tem alto ponto de fusão, cerca de 2060° C [6], temperatura que a princípio não seria um problema, já que o arco atinge temperaturas muito superiores a esta, de modo que se poderia supor que esta barreira será facilmente fundida. Contudo, no processo TIG na condição CC-, isto não acontece, pois a alta condutividade térmica do alumínio permite que o calor rapidamente se difunda através da peça a ser soldada fundindo-a, mas mantendo o óxido intacto. Os aços, tais como o as ligas de alumínio, formam camadas de óxidos sobre suas superfícies, todavia o ponto de fusão destas é próximo ao do substrato. Além disso, a difusividade térmica dos aços é menor, o que contribui para que a soldagem a arco dos mesmos não apresente problemas, ao menos a este respeito.

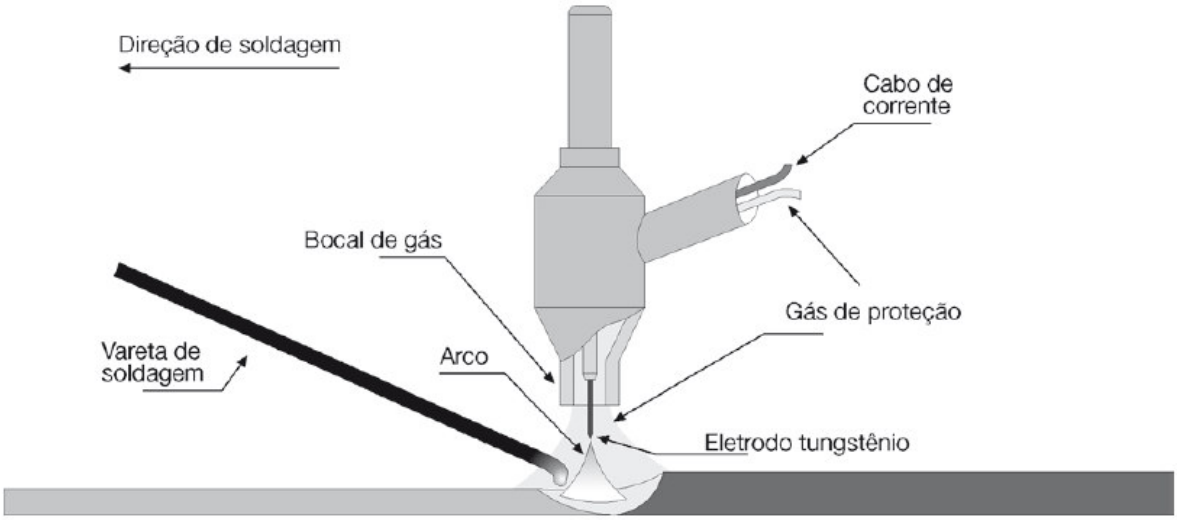


Figura 1 - Representação esquemática do processo TIG – região do arco.

A remoção de óxidos no alumínio poderia ser efetuada com a utilização de corrente contínua e eletrodo ligado ao pólo positivo (CC+). Entretanto, isto é no mínimo não usual, devido à instabilidade de arco e a acentuada deterioração do eletrodo de tungstênio. Por esta razão, emprega-se uma condição intermediária, ou seja, a utilização de corrente alternada (TIG CA). Esta ação de remoção de óxido é promovida durante a fase de polaridade positiva e é conhecida como limpeza catódica. A teoria mais aceita que tenta explicar a remoção de óxidos está ligada ao mecanismo de emissão de elétrons a partir da peça de trabalho que ocorre durante as fases de corrente positivas. Alguns mecanismos foram propostos para explicar a emissão de elétrons a partir de cátodos formados por materiais como o alumínio como, por exemplo: efeito de campo, efeito conjunto de campo e termiônico, liberação de íons positivos em vapores formados no cátodo [7]. No entanto, no contexto deste trabalho, a

emissão de elétrons por efeito de campo será considerada como o mecanismo predominante durante as fases de corrente positivas. O mecanismo de emissão de elétrons que ocorre durante as fases de corrente negativa é o efeito termiônico, mais bem documentado, como será visto mais adiante neste item.

Antes, é conveniente entender que os fenômenos característicos relacionados ao efeito de campo e o efeito termiônico, ocorrem em regiões microscópicas do arco voltaico. A queda de tensão ao longo de um arco voltaico não é uniforme, existindo quedas abruptas de tensão junto aos eletrodos (ânodo e cátodo) [7]. A Figura 2 mostra as três principais regiões em um arco voltaico: Região de Queda Catódica, Coluna do Plasma e Região de Queda Anódica. A maior região é a Coluna do Plasma e é apenas um plasma condutor conectando as outras partes menores, próximas aos eletrodos [8] e o valor de sua queda de tensão é aproximadamente proporcional ao seu comprimento, sendo a constante de proporcionalidade o valor correspondente à intensidade do campo elétrico [9].

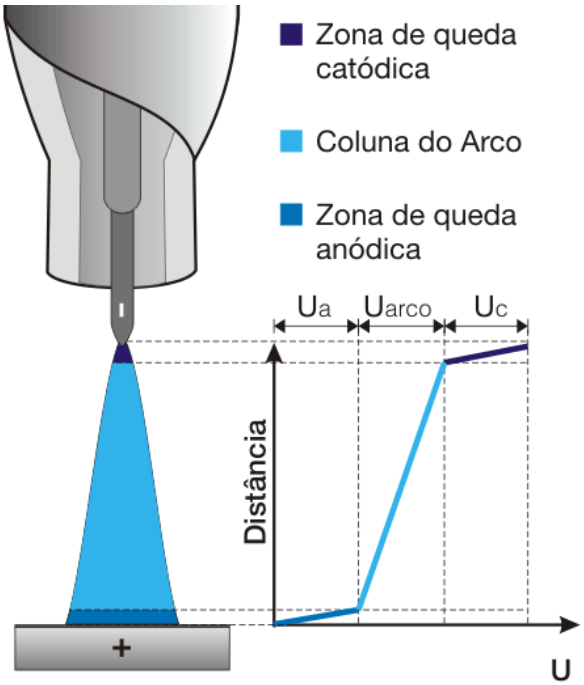


Figura 2 - Principais regiões do arco voltaico [9].

As Regiões de Queda Catódica e Anódica são muito menores em relação à Coluna do Arco e caracterizam-se por campos elétricos e térmicos de grande intensidade [10]. Na condição mostrada pela Figura 2, onde o eletrodo está conectado ao pólo negativo, estima-se

que o campo elétrico na Região de Queda Catódica seja da ordem de 10^8 V/m. Nesta região, ocorre uma série de fenômenos decorrente da emissão de elétrons.

A Região de Queda Anódica é uma fina camada envolvendo a superfície do ânodo e a intensidade do campo elétrico é estimada entre 10^6 e 10^7 V/m, para a condição mostrada na Figura 2.

Convém ressaltar que um arco MIG/MAG apresenta as mesmas regiões. Entretanto, na condição CC+, que é normalmente utilizada neste processo de soldagem, a disposição das regiões de Queda Catódica e de Queda Anódica se inverte. Deste modo, a primeira fica localizada junto da superfície da peça de trabalho enquanto a segunda fica localizada na região mais próxima ao eletrodo. Os fenômenos relacionados ao fluxo de íons e elétrons serão diferentes assim como as intensidades dos campos elétricos.

Já no processo TIG CA, essa inversão na disposição das regiões do arco deve ocorrer com a mesma freqüência da alternância de polaridade. Durante a fase negativa, os elétrons são emitidos a partir do eletrodo de tungstênio por intermédio de efeito termiônico. A emissão termiônica é um fenômeno comum em válvulas eletrônicas e tubos de raios catódicos e, basicamente, resulta do aquecimento do material a uma temperatura suficientemente alta para causar a ejeção de elétrons de sua superfície [7]. Segundo Lancaster [10], nos processos de soldagem, a emissão de elétrons por efeito termiônico ocorre para cátodos constituídos de materiais de alto ponto de ebulição (acima de 4000 K), tais como o tungstênio.

Quando emitindo elétrons termionicamente, a mancha catódica (onde os fenômenos de emissão ocorrem) localizada na ponta do eletrodo de tungstênio apresenta uma densidade de corrente que, segundo Lancaster [10], está entre 10^6 e 10^8 A/m². A Equação (1), conhecida como equação de Richardson-Dushman, mostra que maiores densidades de corrente são atingidas quanto maior for à temperatura do cátodo e menor a sua função-trabalho (energia requerida para um elétron escapar da superfície do sólido). Portanto, quanto mais alta a temperatura que o cátodo pode atingir, mais fácil atingirá a faixa de densidade de corrente característica da emissão termiônica.

$$J = AT^2 e^{-\frac{\phi}{kT}} \quad (1)$$

Onde:

J = Densidade de corrente resultante da emissão de elétrons por efeito termiônico (A/m^2).

A = Constante característica do eletrodo ($A.m^{-2}K^{-2}$).

T = Temperatura na superfície do cátodo (K).

ϕ = Função-trabalho do material (V).

k = Constante de Boltzmann ($1{,}38x10^{-23} J/K$).

Modenesi [7] explica esta equação por intermédio de um exemplo utilizando valores e escreve: "a análise desta equação mostra que a emissão termiônica pode ocorrer em materiais refratários (...) e que este mecanismo não deve ter uma participação importante na emissão de elétrons em cátodos dos metais mais utilizados em componentes soldados, como ferro e alumínio. Por exemplo, considerando-se os valores de ϕ e de A como 4 V e $7x10^5 Am^{-2}K^{-2}$, respectivamente, tanto para o ferro quanto para o tungstênio, obtém-se, pela equação de Richardson-Dushman, nas temperaturas de ebulição (T) destes elementos:"

$\mathbf{J_{Fe}} = 3x10^6 A/m^2$ a $\mathbf{T}$ = 3160 K

$\mathbf{J_W} = 8x10^9 A/m^2$ a $\mathbf{T}$ = 5800 K

"No caso de, por exemplo, um arco operando com 250 A, a área da região do cátodo, para manter este nível de corrente, deveria ter cerca de 83 mm² e 0,031 mm² (ou seja 10 e 0,2 mm de diâmetro) para o Fe e o W, respectivamente. A dimensão estimada do cátodo para o eletrodo de tungstênio corresponde bem ao observado no arco TIG com eletrodo negativo. Contudo, para um processo com eletrodo consumível, ou para a soldagem TIG com eletrodo positivo, o valor estimado da área catódica é muito grande, indicando que mecanismos alternativos para a emissão de elétrons devem atuar neste caso."

Pelos valores calculados para J_{Fe} (densidade de corrente calculada para o ferro) e J_W (densidade de corrente calculada para o tungstênio), é possível notar que este autor não se atém à faixa de densidades de corrente estimada por Lancaster, optando por analisar a área do cátodo que resultaria de uma dada corrente de soldagem. Contudo, a temperatura de ebulição

do material foi considerada para o cálculo das densidades de corrente tal como proposto por Lancaster [10].

Segundo as suposições propostas por Modenesi [7] e Lancaster [10], durante as fases onde o cátodo é a peça de trabalho (polaridade positiva), a emissão de elétrons não mais ocorreria por efeito termiônico, devido à baixa temperatura de ebulição do mesmo (cátodos ditos não-termiônicos, tais como o alumínio) e a emissão ocorre agora pela ação de um campo elétrico em uma região microscópica sobre o cátodo, caracterizando a emissão de elétrons por efeito de campo [1, 11, 12]. O valor do campo elétrico pode exceder 10^9 V/m [12].

Uma teoria que pode explicar a limpeza catódica baseia-se no fato de que, durante a polaridade positiva, ocorre a formação de múltiplas manchas catódicas (onde os fenômenos relacionados a emissão de elétrons ocorrem) microscópicas sobre a região onde está ocorrendo a soldagem. Estas manchas catódicas, ou pontos catódicos, duram por um determinado tempo, ou seja, "nascem" e "morrem" com grande rapidez durante o tempo em que dura a fase de polaridade positiva (no caso do processo TIG CA). Durante seu curto intervalo de vida, estas manchas catódicas seriam capazes de promover a remoção ou a fusão da camada de óxidos. Tentando elucidar melhor esta questão, a Figura 3 mostra um modelo que faz a comparação entre as condições polaridade negativa e a positiva, onde é caracterizado que a área de contato entre o arco e a superfície da peça de trabalho é muito maior em A1 (mancha anódica) do que em A2 (mancha catódica). Com isso, supõe-se que, para uma dada corrente de soldagem, tenha-se uma densidade de energia muito maior em A2. Esta densidade de energia é, provavelmente, insuficiente para que ocorra a emissão de elétrons por intermédio do mecanismo termiônico, mas concentra calor suficiente para que ocorra a fusão ou rompimento da camada de Al_2O_3.

A limpeza catódica também é fundamental para a soldagem MIG do alumínio, porém o emprego de corrente alternada não se faz necessário, pois o processo MIG é normalmente utilizado na condição CC+.

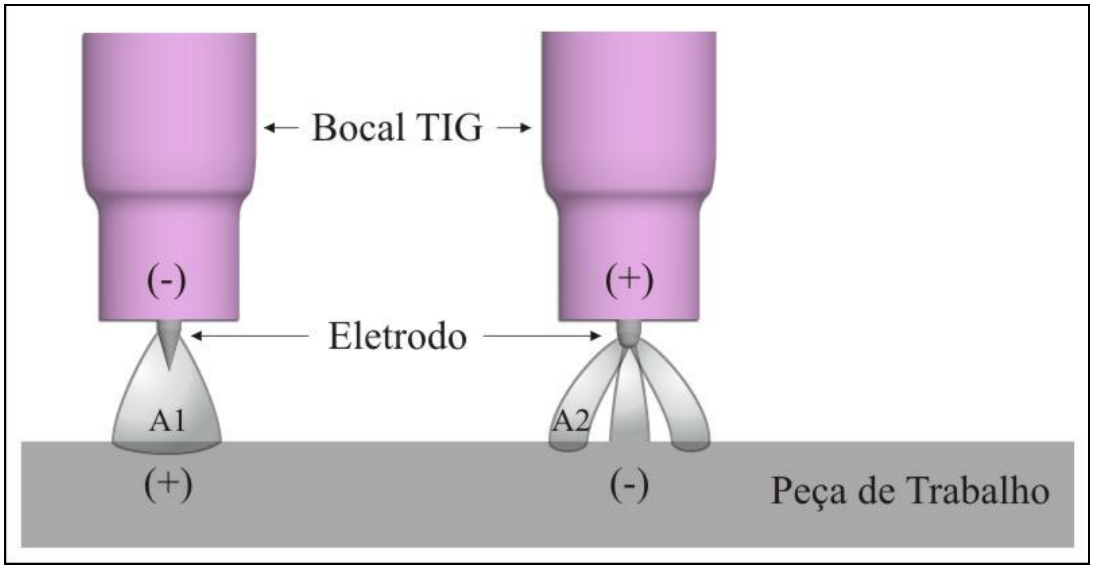


Figura 3 - A1) Área de atuação da mancha anódica sobre a superfície da peça a ser soldada durante a polaridade negativa; A2) Área de atuação da mancha catódica sobre a superfície da peça a ser soldada durante a polaridade positiva.

2.2.1 Efeitos dos mecanismos de emissão sobre as características físicas do arco TIG

Para o processo TIG, seja operando em corrente contínua ou alternada, uma fonte de soldagem do tipo corrente constante (na qual o valor de corrente é regulado) deve ser utilizada. O principal motivo para tal está no comportamento da curva corrente x tensão (característica estática) do arco TIG (Figura 4).

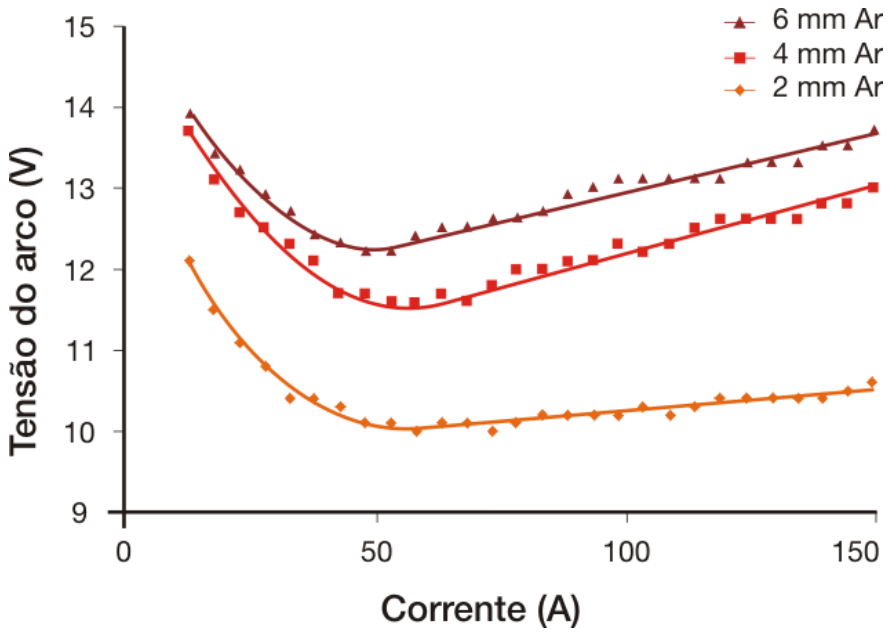


Figura 4 - Curva corrente x tensão (característica estática) do arco TIG para três distâncias eletrodo-peça – 2, 4 e 6 mm. Gás de proteção empregado: Argônio.

As três curvas corrente x tensão, representadas no gráfico da Figura 4, são para diferentes distâncias eletrodo-peça (DEP) (2, 4 e 6 mm). Estas curvas mostram um comportamento que é primeiro descendente e depois ascendente, à medida que aumenta a corrente. Para uma região de baixas correntes (I < 50 A), a tensão diminui com o aumento de corrente. Isto pode ser explicado pelo fato de que o aumento da corrente elétrica incorre em um maior aquecimento do cátodo (facilitando a emissão de elétrons) e um maior grau de ionização e aquecimento do meio em que o arco ocorre, resultando em uma maior facilidade para passagem de corrente e, como conseqüência, uma diminuição da tensão elétrica do arco [13, 14]. Um arco voltaico operando em uma fonte de tensão constante (onde a tensão é regulada), não se manteria estabilizado. Tomando como exemplo a curva tensão x corrente correspondente a DEP de 6 mm e supondo uma regulagem de 13 V, haverá dois valores de corrente possíveis: um dentro da faixa entre 0 e 50 A, com intensidade em torno de 30 A, e outro mais a direita no gráfico com uma intensidade em torno de 100 A. A primeira condição, onde a intensidade de corrente está em torno de 30 A é instável devido à natureza do arco voltaico, que tende a procurar situações onde a emissão e condução de elétrons seja mais propicia, encontrando esta condição exatamente na intensidade de 100 A, onde, provavelmente, tanto eletrodo quanto o meio circundante estão mais aquecidos. Na condição correspondente a 100 A, a corrente não aumenta ainda mais pois não há tensão disponível para tal.

A soldagem TIG CA usando fontes eletromagnéticas também tem suas particularidades, de outra ordem. Neste tipo de fonte, o formato de onda de corrente tem características semelhantes àquela fornecida pela rede elétrica (formato de onda senoidal). Isto implica em limitações, como a impossibilidade de se controlar a freqüência de inversão de polaridade e o formato de onda de corrente. A Figura 5 mostra um oscilograma real de corrente e tensão comumente obtido em uma soldagem TIG CA do alumínio, utilizando uma fonte de soldagem eletromagnética, sem balanceamento de onda. Quando a peça se torna o cátodo, a tensão nesta fase é maior e quase constante ao longo do respectivo intervalo (exceto pelo pico de tensão que ocorre imediatamente após a transição de negativo para positivo). Na situação em que o cátodo é o eletrodo de tungstênio, o formato da curva de tensão segue comportamento similar ao da corrente, tendo valores médios menores. Mesmo demandando maior tensão na fase positiva, a corrente é sensivelmente menor, justificado pelo fato da maior dificuldade de se extrair elétrons a partir de um cátodo “frio” ou não-termiônico.

Considerando a visão tradicional a respeito do processo TIG, a menor amplitude da corrente positiva seria vantajosa, pois causaria menor desgaste do eletrodo, e a maior corrente negativa contribuiria de forma decisiva para a fusão do metal de base. Esta idéia foi uma das razões que motivaram a realização deste trabalho, e que acabou não se confirmando durante os experimentos.

Em fontes eletrônicas, as variações descritas no formato de onda ocorrem somente para a tensão. A corrente é imposta em um formato de onda retangular (Figura 6) de modo que transição de uma polaridade para outra ocorre de forma quase instantânea, o que contribui para que não ocorram maiores dificuldades na re-ignição do arco. As fontes eletrônicas, que empregam formato de onda retangular, têm desta forma, ampla vantagem sobre as fontes eletromagnéticas e permitem a regulagem da freqüência de inversão de polaridade assim como a possibilidade de regular a predominância de uma polaridade sobre a outra.

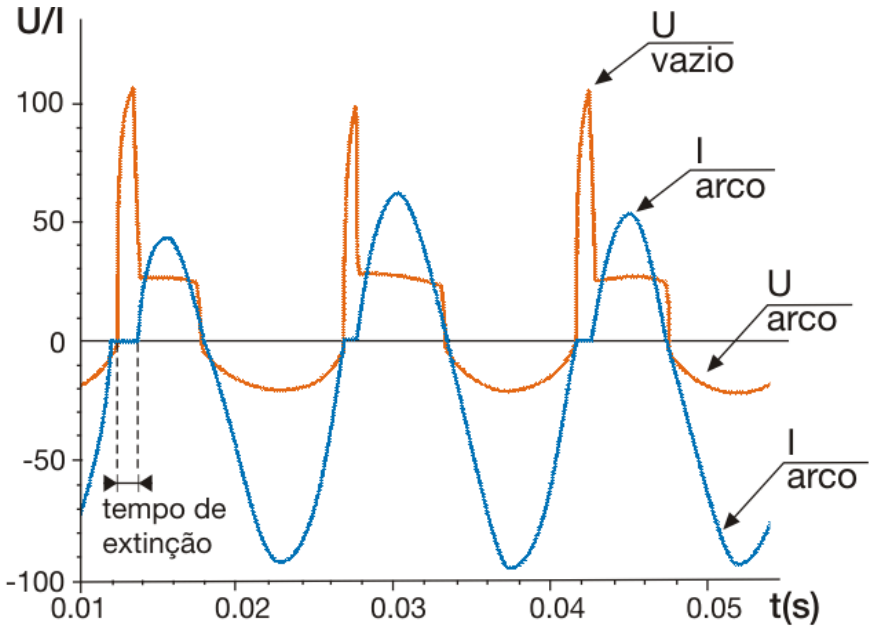


Figura 5 - Oscilogramas de tensão e corrente característicos de uma soldagem TIG CA do alumínio utilizando uma fonte de soldagem eletromagnética.

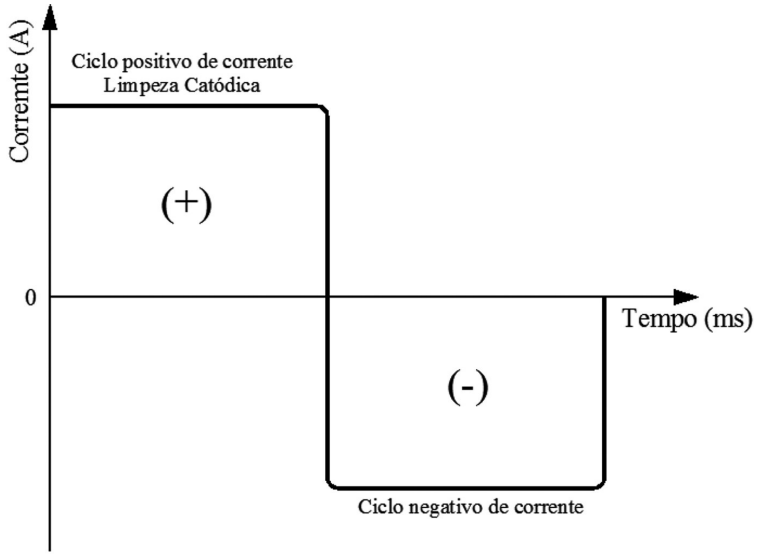


Figura 6 - Formato de onda retangular para o processo TIG CA (regulada em 50% eletrodo positivo e 50% eletrodo negativo).

2.2.2 Efeitos da polaridade sobre as dimensões do cordão de solda no processo TIG CA

O entendimento tradicional sobre o processo TIG CA aplicado ao alumínio, induz a suposição de que um maior tempo de atuação da polaridade negativa em relação à polaridade positiva produz cordões de solda com maior penetração e o aumento do tempo de atuação da polaridade positiva conduz a uma maior ação de remoção de óxidos, porém, diminuindo a penetração de solda. Algumas fontes de soldagem exibem exatamente isto em seus painéis de regulagens.

A origem desta suposição está sobretudo nas afirmações presentes na literatura corrente [3, 6, 12, 13, 15], de que o uso de CC- resultaria em um balanço de energia favorável à fusão do metal de base (70% do calor imposto ao metal de base e o restante imposto ao eletrodo). Uma soldagem nesta condição resultaria em cordões de solda estreitos e profundos. A situação seria exatamente a oposta quando na condição CC+, gerando cordões mais largos e menos profundos como resultado. O processo com variação de polaridade é considerado uma situação intermediária em que haveria um balanço de 50% do calor gerado imposto à peça e 50% do calor gerado imposto ao eletrodo de tungstênio. A Figura 7 é comum em publicações sobre processos de soldagem a arco.

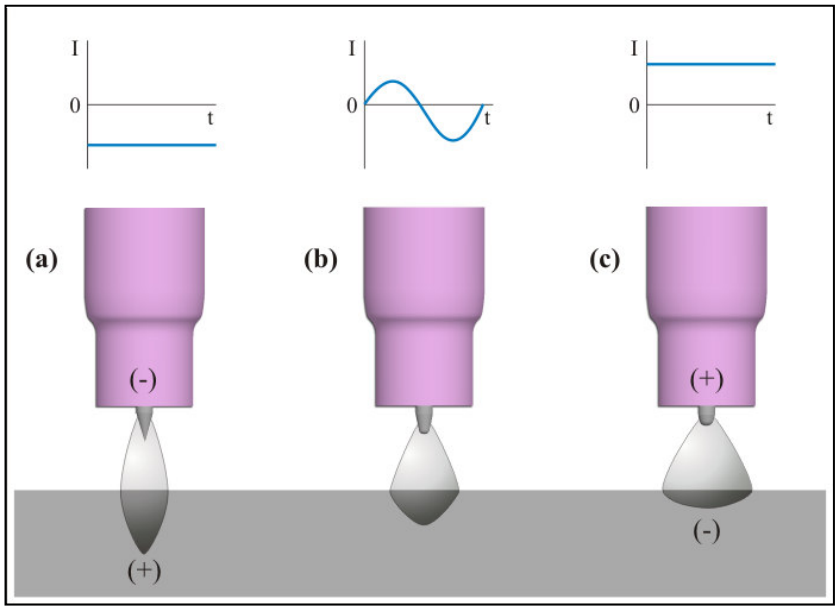


Figura 7 – Representação comumente encontrada na literatura: a) Processo em CC-, mostrando uma seção transversal de solda estreita e profunda; b) Processo em CA mostrando uma seção transversal de solda com características intermediarias entre CC- e CC+ e já apresentando desgaste no eletrodo; c) Processo em CC+ mostrando uma seção transversal larga e rasa, com grande desgaste de eletrodo [3, 6, 12, 13, 15].

Apesar de o processo TIG existir desde o fim dos anos 1930 [12], alguns aspectos relacionados ao que foi mencionado anteriormente, só receberam devida atenção em trabalhos recentes. Conforme os resultados de Fuerschbach [1], algumas suposições baseadas em publicações [3, 6, 12, 13, 15] e apresentadas na Figura 14, não se confirmam. Este autor realizou medições do aporte térmico de soldas de alumínio 1100 e aço inoxidável AISI 304 em juntas sobrepostas em aresta, usando processo Plasma CA e não verificou mudança significativa nos valores registrados, à medida que maiores tempos de polaridade positiva foram impostos. No caso do alumínio, por intermédio da análise da zona fundida, este autor verificou que é possível conseguir bom rendimento de fusão em situações onde havia grande predominância da polaridade positiva sobre a negativa. Todavia, não pôde determinar uma relação entre o aumento do tempo de polaridade positiva e as características da zona fundida, pois os resultados apresentavam uma grande dispersão.

Scotti et al. [16] realizaram experimentos com o intuito de determinar a influência da intensidade da corrente durante as fases positivas e negativas e o tempo de duração da fase negativa, I(+), I(-) e t(-) respectivamente, sobre numerosos aspectos relacionados à soldagem TIG CA do alumínio, incluindo penetração, largura e área fundida. Seus resultados indicaram

que não houve influência da intensidade da corrente positiva I(+) sobre qualquer um dos aspectos citados. O trabalho de Scotti et al. [16] focou muito mais na influência de t(-) sobre a zona fundida e o tempo de duração da fase positiva t(+) foi mantido constante em todos os ensaios, com apenas uma exceção. Neste último, t(+) foi aumentado enquanto t(-) foi mantido constante e o resultado foi uma melhoria nos parâmetros geométricos do cordão de solda (um cordão de solda mais largo e mais profundo) em comparação com um experimento anterior onde t(+) foi menor. Embora este resultado fosse inesperado, nenhum experimento adicional foi realizado para investigar este fenômeno.

Em trabalho mais recente, Yarmuch e Patchett [17] determinaram uma relação diretamente proporcional entre o tempo de atuação da polaridade positiva e as dimensões da zona fundida, em um liga de Al-Mg 5083. À medida que o tempo de duração da fase positiva t(+) aumentava em relação ao período total do ciclo de corrente, aumentavam largura e penetração de solda. A Figura 8 mostra alguns dos resultados encontrados por estes autores, no que diz respeito a penetração.

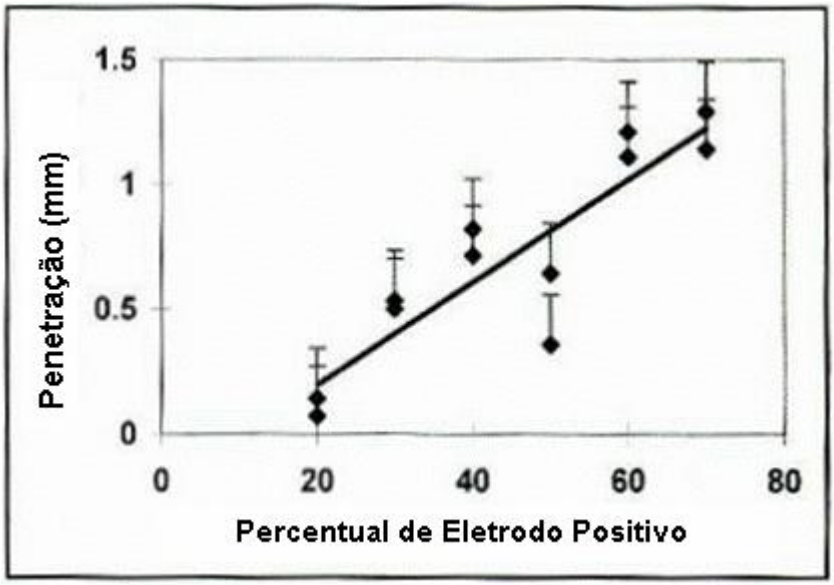


Figura 8 – Resultados de Yarmuch e Patchett [17]: à medida que aumentou o tempo de atuação da polaridade positiva (percentual de eletrodo positivo) aumentou também a penetração.

Apesar de alguns resultados distintos entre os trabalhos de Fuerschbach [1] e Yarmuch e Patchett [17], ambos atribuem à maior capacidade de fundir o metal de base de alumínio, quando se aumentava a atuação da polaridade positiva (por intermédio do aumento do tempo

de duração ou da intensidade da corrente na polaridade positiva), a fenômenos decorrentes da emissão de elétrons por efeito de campo que ocorrem durante a polaridade positiva.

Tentando explicar isto, Fuerschbach [1] propôs uma teoria e remeteu-se a trabalhos de físicos como Cobine [18] que desenvolveram equações que expressam o aquecimento do cátodo e do ânodo, quando os elétrons estão sendo emitidos por efeito termiônico. Este pesquisador define que o calor gerado, em função dos fenômenos que ocorrem no ânodo (*Ha*), é resultante do choque dos elétrons contra o mesmo. Estes elétrons entregam toda a energia acumulada em função da aceleração causada pelo gradiente de tensão existente na região de queda anódica (definido por $_{jV_a}$, onde *j* é a densidade de corrente e V_a a queda de tensão anódica). Cada elétron que se choca contra o ânodo, carrega consigo ainda uma energia adicional relacionada àquela necessária para emitir um elétron, ou função-trabalho ($_{j\phi}$) [2], que também é entregue ao ânodo. Isto é resumido na Equação (2).

$$Ha = j(V_a + \phi) \tag{2}$$

Os fenômenos que ocorrem no cátodo são diferentes. Neste o calor gerado (*Hc*) é estimado por intermédio da Equação (3). Do mesmo modo que o ânodo é cercado de cargas negativas (elétrons) o cátodo é cercado de cargas positivas (íons) [2]. Estes íons são acelerados pelo gradiente de tensão na região de queda catódica e fornecem energia (definido por $_{j_iV_c}$, onde $_{j_i}$ é a densidade de corrente carregada pelos íons e $_{V_c}$ a queda de tensão catódica). Energia adicional é suprida pelos íons quando estes são neutralizados na superfície do cátodo ($_{j_iV_i}$, onde V_i é o potencial de ionização do plasma). Energia é perdida na emissão de elétrons ($_{J_e\phi}$, onde *je* é a densidade de corrente carregada por elétrons emitidos termionicamente). Ou seja, para cada elétron emitido é necessária uma determinada energia, no caso, a função-trabalho (ϕ), e esta energia é provida pelo cátodo. Autores como Fuerschbach [1] referem-se a esta perda de calor como efeito de resfriamento (*cooling effect*). VonEngel [19], por exemplo, observa que há um resfriamento substancial pela emissão de elétrons para o eletrodo de tungstênio, na polaridade negativa, de modo que o desgaste provocado neste é muito pequeno. Além desta perda, uma porção de energia também é perdida pela neutralização de íons positivos por elétrons ($_{j_i\phi}$).

$$Hc = j_i V_c - j_i \phi + j_i V_i - j_e \phi = j_i (V_c + V_i - \phi) - j_e \phi \quad (3)$$

Durante a soldagem TIG CA, quando o eletrodo de tungstênio torna-se o ânodo na fase positiva de corrente, não emitindo mais elétrons, as perdas de calor no eletrodo de tungstênio denotadas por ($J_e \phi$), não mais ocorrem, e isto gera grande desgaste do tungstênio. Durante esta mesma fase, a peça de trabalho passa a suprir elétrons por efeito de campo e, segundo outro físico citado por Fuerschbach, VonEngel [19], a emissão por efeito de campo diferencia-se do efeito termiônico, "pois causa uma distribuição de energia distinta e nenhum efeito de arrefecimento ocorre". Ou seja, as perdas causadas por cada elétron emitido são aplicáveis somente a materiais que sustentam a emissão de elétrons por intermédio de efeito termiônico e o alumínio não se encaixa neste perfil. Se nenhuma perda ocorre para cada elétron emitido, maior calor é gerado na peça de trabalho e isto se traduz em uma melhoria nas características de fusão do cordão de solda.

Na polaridade negativa, a emissão de elétrons ocorre por intermédio de efeito termiônico o que demanda menor tensão na região de queda catódica. Na polaridade positiva, a emissão de elétrons se dá por efeito de campo o que demanda uma maior tensão na região de queda catódica. Isto também resulta em maior geração de calor na região de queda catódica e também contribui para um aumento de fusão do metal de base à medida que se aumenta a atuação da polaridade positiva no processo TIG CA.

2.3 Processo MIG/MAG

O processo MIG/MAG caracteriza-se por um arco voltaico estabelecido entre um eletrodo consumível (arame-eletrodo) e a peça de trabalho (Figura 9). A região do arco voltaico pode ser protegida por um gás inerte (argônio ou hélio, o que é mais comum na soldagem do alumínio e suas ligas), um gás ativo (como CO_2, por exemplo) ou por misturas entre estes e outros tipos de gases, sendo que o gás inerte aparece sempre em maior proporção na mistura. O arame-eletrodo, sendo alimentado continuamente, funde no calor do arco e gotas de metal líquido de algum modo são transferidas de forma intermitente para a poça de fusão e assim formam o cordão de solda.

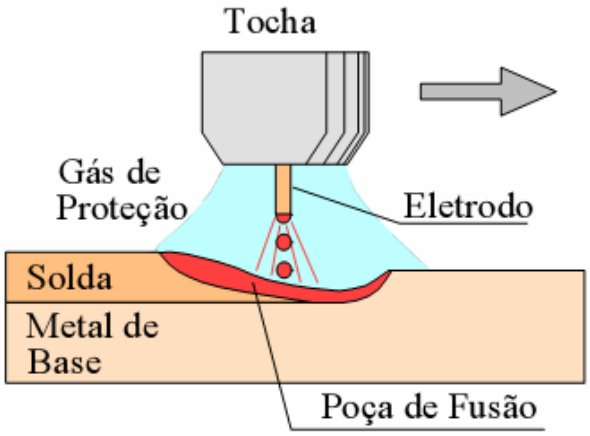


Figura 9 - Representação esquemática do processo MIG/MAG – região do arco [20].

2.3.1 A Influência da polaridade no processo MIG/MAG sobre a transferência metálica, taxa de fusão e as características geométricas do cordão de solda

O uso do processo MIG/MAG Convencional com corrente contínua e eletrodo ligado ao pólo negativo (CC-) incorre em grandes diferenças em relação à sua utilização em corrente contínua e eletrodo ligado ao pólo positivo (CC+). Estes diferenças são notáveis na transferência metálica, na taxa de fusão de arame-eletrodo e na geometria do cordão de solda resultante. Por exemplo, a profundidade de penetração da zona fundida, realizada com MIG/MAG CC- é menor em relação a outra realizada com MIG/MAG CC+ nas mesmas condições, pois há menor energia de soldagem imposta a peça. Isso pode ser um aspecto indesejável na maioria das aplicações, onde há a necessidade de unir duas peças, assegurando a continuidade física da junta. A polaridade tem influência sobre taxa de fusão, no sentido que, a uma dada condição (corrente, gás de proteção, distância bico de contato-peça), uma soldagem realizada em CC- proporcionará uma taxa de fusão maior do que outra realizada em CC+ (isto no caso de arames-eletrodos comuns e não com arames-eletrodos aditivados). Esta é uma característica que pode ser vantajosa, pois se poderia usar maiores velocidades na movimentação da tocha de soldagem durante a operação.

Algumas das características descritas anteriormente podem ser desejáveis, outras nem tanto, dependendo da aplicação. Mas o que realmente limita o uso do processo MIG/MAG CC- é a grande instabilidade de transferência metálica que pode causar esta configuração. A transferência metálica é usualmente limitada à condição globular e a gota fundida na ponta do arame-eletrodo tende a ser repelida para longe da poça de fusão, indo muitas vezes na direção

oposta na forma de respingos grosseiros em grande quantidade. Como resultado, a aparência e as características do cordão de solda não são aceitáveis. Lancaster [10] atribui isto a uma força catódica repulsiva relacionada à formação de um ponto catódico na extremidade inferior da gota metálica de natureza bastante instável. O ponto catódico é identificado por uma grande concentração de energia luminosa, como mostrada na Figura 10.

Figura 10 - Imagens da gota metálica sendo repelida e movimentação do ponto catódico [21].

Por esse motivo, apesar de algumas características que podem melhorar a produtividade ou serem propicias em algumas situações, o processo MIG/MAG é comumente usado na condição CC+.

Mesmo com esta grande desvantagem, o aumento na taxa de fusão de arame na condição CC- seria uma característica inegavelmente favorável. Uma estimativa da taxa de fusão (Tf)

pode ser feita pela Equação (4) que expressa matematicamente a taxa de fusão e envolve a corrente de soldagem (I) e do comprimento da extensão sólida do arame-eletrodo (L) (Figura 11).

$$Tf = \alpha I + \beta L I^2 \tag{4}$$

Onde:

α = Constante relacionada ao calor gerado por fenômenos no arco. Dependente também da composição do gás de proteção e da polaridade;

β = Constante dependente do diâmetro (de) e resistividade do arame-eletrodo.

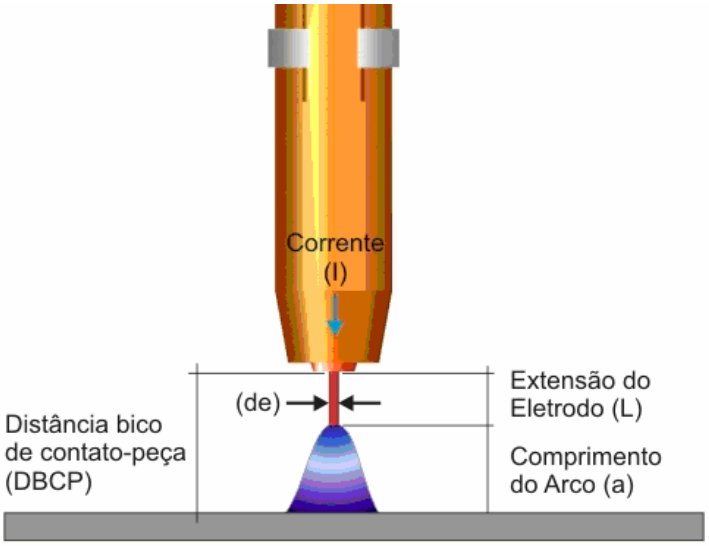


Figura 11 - Valores envolvidos no cálculo da taxa de fusão (Tf): corrente de soldagem (I), comprimento da extensão do eletrodo (L).

A Equação (4) é a soma de duas parcelas representativas dos fenômenos responsáveis pela geração de calor para a fusão de arame-eletrodo: A primeira parcela é, segundo Lesnewich [2], originada de fenômenos que ocorrem na região de queda anódica (ou catódica, se o eletrodo estiver conectado ao pólo negativo) e a segunda é devido ao calor gerado ao longo da extensão do arame-eletrodo em função da resistência a passagem de corrente através do mesmo (efeito Joule).

Com relação à primeira parcela, este autor considerou que na condição CC+ os elétrons emitidos a partir da peça de trabalho fluem através do plasma e são acelerados pelo elevado gradiente de tensão na região de queda anódica e se chocam contra o arame-eletrodo, gerando

o calor para a fusão deste. Para representar o calor gerado no anodo, este autor apresentou a Equação (2), explicada previamente no item 2.2.2.

Na condição CC-, Lesnewich apresentou os fenômenos representados pela Equação (3) (item 2.2.2). No entanto, é sabido que as Equações (2) e (3) aplicam-se quando a emissão de elétrons se dá por efeito termiônico e, ciente de que os materiais estruturais de baixo ponto de ebulição seriam incapazes de suprir a totalidade dos elétrons desta forma, este autor observou que elétrons devem ser emitidos por intermédio de outros mecanismos como o efeito de campo. Esta idéia também foi sugerida por Essers e Walter [22].

Supondo que o efeito de campo seja o mecanismo de emissão de elétrons predominante em uma soldagem MIG/MAG e à luz de novos resultados em relação ao processo TIG CA apresentados no item 2.2.2, nos quais o mecanismo de emissão de elétrons a partir de um cátodo "frio" ou não-termiônico, revelou-se ter um efeito causador de um aumento na fusão do metal de base, Yarmuch e Patchett [17] levantaram a hipótese de que os mesmos fenômenos relacionados à emissão de elétrons por efeito de campo podem ser a causa que dá origem à maior taxa de fusão encontrada no processo MIG/MAG em CC- e escrevem: "o efeito, mais claramente documentado, da emissão de elétrons a partir de um cátodo frio na geração de calor é a taxa de fusão no processo MIG/MAG, que é sempre maior na polaridade negativa". Em outras palavras, para o processo TIG CA a emissão de elétrons a partir da peça de trabalho gera mais calor, o que contribui para um aumento na fusão do metal de base. Da mesma forma, isto deve contribuir também para um aumento na taxa de fusão do processo MIG/MAG quando o eletrodo está na polaridade negativa e, portanto, emitindo elétrons. Embora os resultados de Yarmuch e Patchett [17] estejam limitados apenas ao alumínio e suas ligas, esta é uma afirmação que faz bastante sentido no caso de arames-eletrodos não aditivados.

Contudo, nem sempre a maior taxa de fusão em CC- é explicada desta forma. A Figura 12 mostra um esquema com o processo MIG/MAG operando com um comprimento de arco alto e o comportamento deste em função de cada polaridade. Na condição CC+, o ponto de contato do arco com o eletrodo toma lugar na sua extremidade (neste caso, o ânodo), envolvendo apenas a gota metálica em formação. Este fato contribui de forma significativa para a estabilidade de arco encontrada nesta condição, pois a ação da força eletromagnética, responsável pelo destacamento, age de forma bastante pronunciada sobre a gota de metal

líquido. Na condição CC-, o arco salta para a extensão sólida do eletrodo (neste caso, o cátodo), buscando pontos onde a emissão de elétrons seja favorecida pela presença de óxidos (pontos catódicos). Ao envolver a extensão sólida do eletrodo, o calor do arco seria usado de forma mais eficiente para fundi-lo e a taxa de fusão torna-se mais alta [23, 24]. A gota metálica aumenta até várias vezes o diâmetro do eletrodo e ainda pode ser repelida para longe da poça de fusão, conforme já foi comentado.

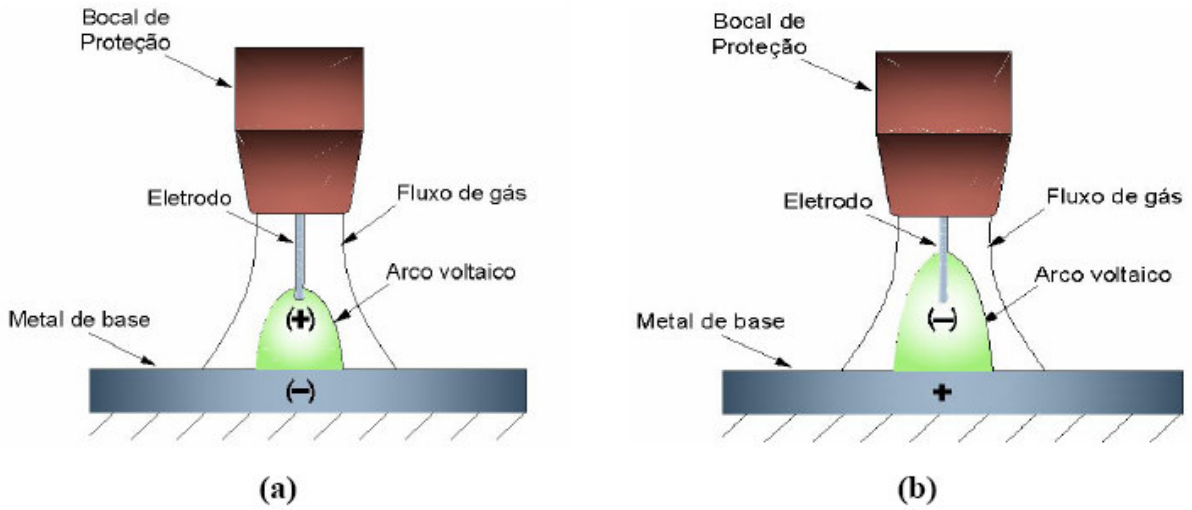


Figura 12 - (a) Comportamento do arco em CC+ e (b) em CC-.

Scotti e Ponomarev [25] observam que na verdade estes fenômenos coexistem. Ou seja, os fenômenos citados nos parágrafos anteriores ocorrem um em função do outro e acabam se combinando para resultar em uma maior taxa de fusão na condição CC-.

Outro efeito marcante do efeito da polaridade no processo MIG/MAG é sobre as características geométricas do cordão de solda. Há uma diferença notável nas características geométricas entre um cordão de solda realizado na condição CC+ e outro na condição CC-. O cordão de solda resultante de uma soldagem em CC+ apresentará melhores características de molhabilidade, maior penetração de solda e maior área fundida. O cordão de solda realizado em CC-, nas mesmas condições, será mais convexo, terá menor penetração e área fundida.

Diferente do processo TIG, onde a poça de fusão pode ser considerada plana e o calor gerado é função unicamente de fenômenos relacionados com emissão de elétrons e formação de íons, convecção e radiação, no processo MIG/MAG há transferência metálica através do arco. Portanto, a poça de fusão não pode ser considerada plana e calor é transferido da gota

metálica para a poça de fusão no momento do impacto e isto também deve ser considerado. Na condição CC+, o arco ancora diretamente na gota metálica de modo que esta é destacada numa condição superaquecida e seu calor é transferido para a poça de fusão, o que contribui para o aumento de fusão. Na condição CC-, o arco está ancorado na extensão sólida do eletrodo, e apesar de haver maior aproveitamento do calor gerado para a fusão de arame-eletrodo, este está disperso sobre uma região maior. Supõe-se então que a gota metálica é destacada com menor conteúdo de calor.

Essers e Walter [26] afirmam que a menor parte do calor transferido para a região da solda é devido às gotas metálicas transferidas (25%). O calor transferido por radiação, convecção e condução combinadas e pela passagem de corrente representam 34% e 41%, respectivamente. Ao observar a poça de fusão, usando filmagens de alta velocidade, Essers e Walter constataram que o impacto da cada gota com a poça de fusão causa uma deformação ou cavidade no centro desta. Em correntes baixas, a freqüência com que as gotas se chocam com a poça de fusão é pequena e permite que a cavidade seja preenchida pela ação da tensão superficial, antes do impacto de uma nova gota. Em correntes maiores, a freqüência de destacamento é maior e após o impacto de uma gota metálica, não há tempo para que a cavidade se feche. As gotas subseqüentes entram em contato com o fundo da poça de fusão o que aumenta a transferência de calor nesta região. Este efeito é mais pronunciado na condição CC+, sendo que as gotas atingem a poça de fusão com grande velocidade, resultando em maior profundidade de penetração. Nos experimentos de Essers e Walter [26] a velocidade de impacto das gotas metálicas foi menor na condição CC-, o que acarretou em cordões de solda menos profundos. Isto foi atribuído ao fato de que o ponto de contato do arco voltaico estar acima da gota metálica causar uma redução significativa na ação da força eletromagnética sobre a gota metálica, que é destacada e atinge a poça de fusão com menor velocidade.

Hu e Tsai [27] afirmam que o impacto das gotas metálicas sobre a poça de fusão afeta a forma da superfície e a transferência de calor por convecção na poça de fusão. A deformação tem influência sobre a distribuição da corrente e desta forma afeta o fluxo de calor e a energia transferidas do arco para a poça de fusão. Seus resultados basearam-se na simulação do destacamento da gota, transferência desta no arco, transferência de calor na poça de fusão, formação e preenchimento da cavidade em regime de transferência globular em CC+. Na Figura 13 é possível observar esta seqüência e a formação da cavidade, em função do impacto

da gota metálica contra a poça de fusão acarretando também, em um aumento de temperatura no interior desta.

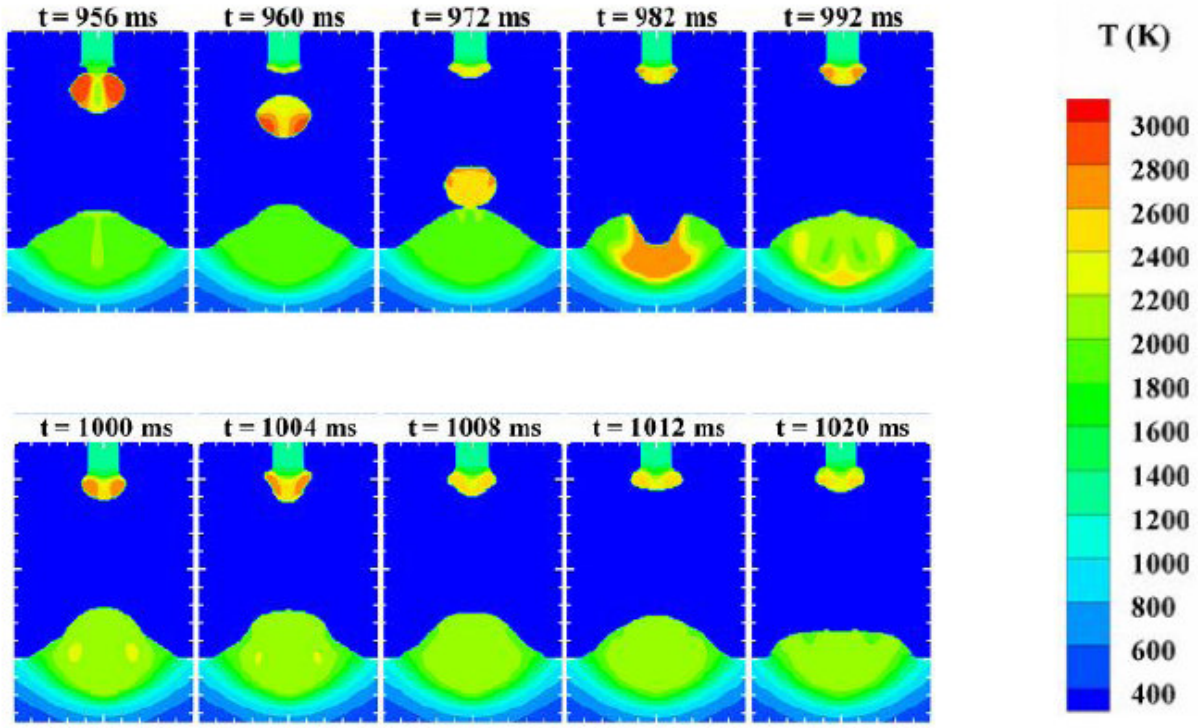


Figura 13 - Simulação mostrando o destacamento da gota metálica, transferência no arco, formação e preenchimento da cavidade na poça de fusão e formação de nova gota [27].

Rodrigues [28] realizou experimentos para determinar a influência da polaridade nas características geométricas do cordão de solda, utilizando um eletrodo ER 70S-6 de diâmetro 1,2 mm, operando em correntes características de transferência globular (200 A) e goticular (250 A). Como gás de proteção foi empregado Ar + 5% O_2. A partir da medição da região de solda das macrografias e posterior análise estatística dos resultados, Rodrigues [28] determinou que a polaridade não tem influência significativa sobre a penetração de solda, porém influi grandemente sobre a largura, reforço e área fundida do cordão. A partir de filmagens de alta velocidade, conseguiu-se avaliar a velocidade com que as gotas metálicas atingem a poça de fusão e constatou que houve diferença significativa entre uma polaridade e outra apenas quando a transferência metálica foi globular. As velocidades medidas foram maiores para a polaridade negativa, contrariando os resultados de Essers e Walter [26].

2.3.2 Sistemas MIG/MAG Pulsado CC+ e CA – Aspectos Fundamentais

Este item compreende uma explanação sobre aspectos das modalidades de processo MIG/MAG Pulsado CC+ e CA, assim como problemas relacionados à soldagem do alumínio e características dos gases aplicados na soldagem desse metal. O conhecimento destes aspectos assiste o entendimento ao último conjunto de resultados a ser apresentado no capítulo seguinte.

A modalidade MIG/MAG Pulsado (na condição CC+) é um método controlado de transferência metálica goticular, na qual a corrente é mantida em um valor alto (pulso) por tempo suficiente para permitir a formação e o destacamento de uma gota metálica. Uma vez destacada a gota metálica, a corrente é reduzida para um valor de corrente relativamente baixo, mas suficiente para manter o arco aberto (base) [29].

A Figura 14 mostra o formato de onda de corrente do tipo retangular, tipicamente usado em sistemas pulsados e seus parâmetros: Ip (corrente de pulso), Ib (corrente de base), tp (tempo de pulso), tb (tempo de base), Im (corrente média) e T (período).

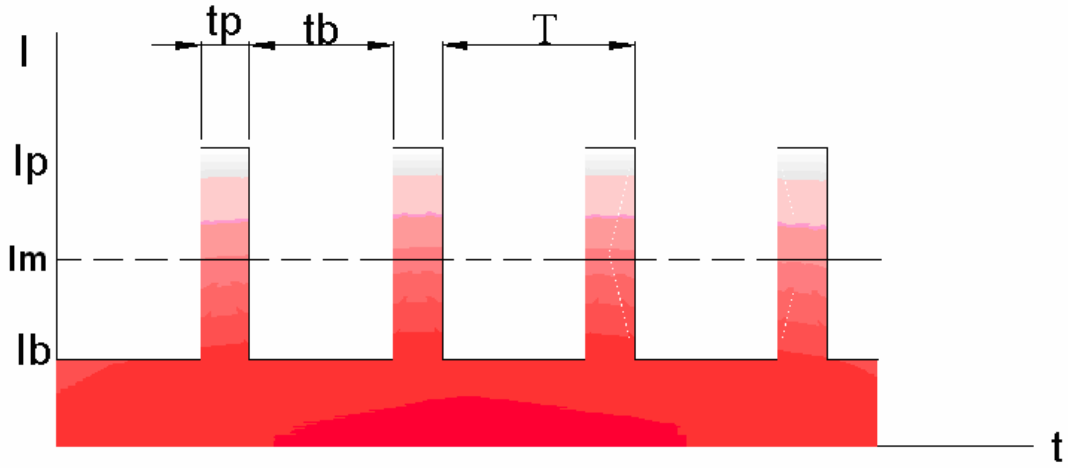


Figura 14 - Formato de onda de corrente na condição pulsado CC+.

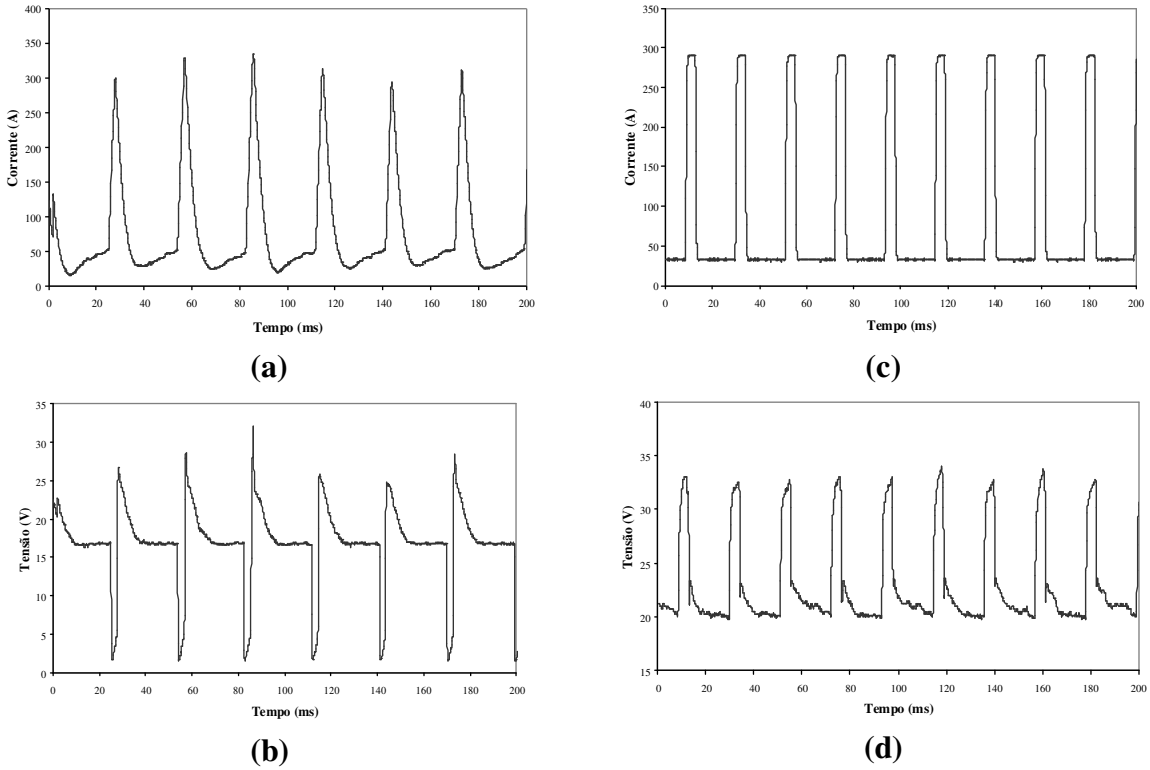
Atuando em conjunto, o par Ip e tp deve prover energia suficiente para garantir a formação e o destacamento de uma gota metálica por pulso (condição UGPP, "uma gota por pulso") [30]. A intensidade de Ib é muito baixa para transferência metálica, mas deve ser

suficiente para evitar que ocorra extinção do arco, conforme já comentado, enquanto tb é o tempo despendido neste nível de corrente. O parâmetro T é o intervalo em que se repete a onda cíclica ou o tempo necessário para a formação e o destacamento de uma gota metálica de determinado diâmetro. A corrente média (Im) é definida pela Equação (5) e deve estar sempre abaixo da corrente de transição. Caso contrário seria mais viável soldar com MIG/MAG Convencional, diretamente com transferência metálica goticular, uma condição mais simples do ponto de vista dos parâmetros (menor número de variáveis) e equipamento [30].

$$\mathrm{Im} = \frac{Iptp + Ibtb}{tp + tb} \tag{5}$$

Dutra et al. [31] descrevem a modalidade MIG/MAG Pulsado comparando-o com o processo convencional operando em curto-circuito: "a concepção de corrente pulsada para o controle da transferência metálica não é nada mais do que uma metodologia de antecipação de picos de corrente para transferir as gotas metálicas antes que estas curto-circuitem na peça".

A Figura 15 exemplifica isto apresentando oscilogramas de corrente e tensão para soldagens realizadas em uma chapa de aço carbono de 3 mm de espessura com o processo operando em curto-circuito e com corrente pulsada. A corrente média para ambas foi praticamente a mesma (as condições de soldagem são mostradas na própria figura). O gás de proteção foi diferente para cada situação (Ar + 25% CO_2 para curto-circuito e Ar + 8% CO_2 para corrente pulsada). O motivo para tal está em extrair o melhor desempenho possível para cada modalidade do processo MIG/MAG, empregando o gás de proteção considerado mais adequado para cada situação. O oscilograma de corrente (a) (processo operando em modo curto-circuito) é característico de boa estabilidade de transferência metálica, denotada pela regularidade no intervalo entre um pico de corrente e outro. Na soldagem em modo pulsado, o intervalo entre um pico de corrente é controlado de forma a ser praticamente o mesmo, "substituindo" os picos de corrente e produzindo transferência metálica goticular livre de respingos.



CURTO-CIRCUITO
Tensão Média: 16,9 V
Corrente Média: 85 A
Potência: 1461 W
Velocidade de Alimentação de Arame: 33,3 mm/s (2,0 m/min)
Gás de Proteção: Ar + 25%CO_2
Arame: ER 70S-6, 1,2 mm
Velocidade de Soldagem: 3,33 mm/s (20 cm/min)

PULSADO
Tensão Média: 22,9 V
Corrente Média: 83 A
Potência: 2295 W
Velocidade de Alimentação de Arame: 33,3 mm/s (2,0 m/min)
Gás de Proteção: Ar + 8%CO_2
Arame: ER 70S-6, 1,2 mm
Velocidade de Soldagem: 3,33 mm/s (20 cm/min)

Figura 15 - a) Oscilograma de corrente em modo curto-circuito; b) Oscilograma de tensão em modo curto-circuito; c) Oscilograma de corrente em modo pulsado; d) Oscilograma de tensão em modo pulsado.

A aparência e o perfil dos cordões de solda produzidos são, obviamente, distintos conforme mostrado na Figura 16, que correspondem aos oscilogramas da Figura 15. O cordão produzido com corrente pulsada (c e d) é mais liso, apresenta maior molhabilidade, é mais largo e um pouco mais profundo do que o produzido em curto-circuito. Isto pode ser explicado pelas diferenças entre o tipo de tranferência metálica que o processo MIG/MAG produz quando opera em curto-circuito ou em corrente pulsada. No processo em curto-circuito, o arco se extingue a cada contato com a poça de soldagem e, conseqüentemente, menos calor é transferido. O processo pulsado permite que o arco se mantenha aberto e transferindo calor para a poça de fusão durante toda a operação de soldagem e assim,

produzindo uma poça de fusão mais fluída. Como no processo pulsado os sinais de corrente e tensão estão sempre em consonância (ver Figura 15), para uma mesma corrente de soldagem, a potência de arco será sempre maior no processo pulsado (neste caso, 2295 W) do que em curto-circuito (1461 W). Da mesma forma, a tensão também será maior no processo pulsado (22,9 V) do que em curto-circuito (16,9 V).

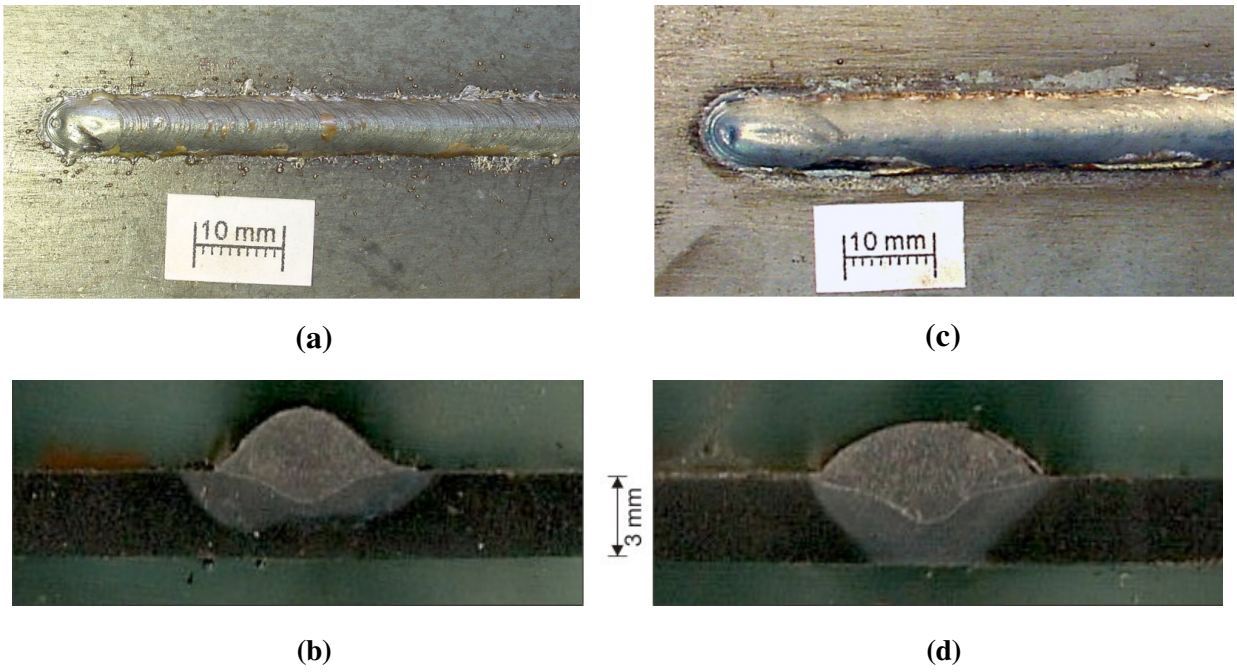


Figura 16 - Correspondentes aos oscilogramas da Figura 15: a) Aspecto superficial do cordão de solda realizado no modo curto-circuito; b) macrografia correspondente a (a); c) aspecto superficial do cordão de solda realizado no modo pulsado; d) macrografia correspondente a (c).

Deste modo, além do controle da transferência metálica, a maior vantagem do processo com pulsação de corrente é a superação das limitações impostas pelo processo convencional. Com o sistema pulsado, em valores de corrente e de tensão (85 A e 22,9 V, no exemplo mostrado) onde certamente se teria uma transferência metálica bastante instável, se tem transferência metálica goticular controlada, livre de respingos, o que resulta em cordões de solda de características superiores.

Para que o processo MIG/MAG funcione de forma estável é essencial que se mantenha um comprimento de arco constante e a velocidade de alimentação de arame (Va) e a taxa de fusão (Tf) devem se igualar [32]. Para o sistema com corrente pulsada não é diferente e existe uma série de estudos abordando metodologias para determinação de parâmetros do sistema

(Ip, tp, Ib, tb, T) [29-34]. Contudo, não cabe aqui explanar muito a respeito destas metodologias. Com o uso de sistemas eletrônicos, as fontes comerciais passaram a incorporar os chamados sistemas sinérgicos [35], que programados com algoritmos para determinação de parâmetros, permitem ao operador a regulagem instantânea de todos os parâmetros do sistema a partir da regulagem de um parâmetro de comando, em geral, velocidade de arame (Va) ou corrente média (Im). O uso de Va como parâmetro de comando dificulta ao operador regular o equipamento para a energia de soldagem desejada [34]. Utilizando Im como parâmetro de comando, permite que o operador faça sua escolha baseada no material e na espessura da chapa a ser soldada, o que soa mais razoável.

A Equação (6) caracteriza a taxa de fusão (Tf) em função da corrente média (Im) escolhida. Pode-se notar que é uma função linear, diferente da Equação (4), e que o coeficiente de fusão K deve incorporar tanto o calor gerado no arco (α) e o calor gerado por efeito Joule (β). Esta equação estima Tf de forma satisfatória para a modalidade MIG/MAG Pulsado, devido, principalmente, a faixa de correntes tipicamente utilizadas, que é limitada a valores bastante baixos.

$$Tf = K.\mathrm{Im} \tag{6}$$

Diante da possibilidade de aliar as características desejáveis do processo MIG/MAG Pulsado CC+ (transferência metálica controlada) e do processo MIG/MAG Convencional CC- (maior taxa de fusão e reduzido calor imposto à peça), foram desenvolvidos formatos de onda de corrente visando operacionalizar esta variante de processo que pode ser chamada de MIG/MAG Pulsado CA.

A Figura 17 mostra dois formatos de onda de corrente já estudadas por alguns pesquisadores, tanto para aço [36-41], quanto para alumínio [23, 24, 36, 42, 43]. A Figura 17.a mostra um formato de onda completamente retangular e a Figura 17.b mostra um formato de onda trapezoidal que se caracteriza pela utilização de um pulso em rampa (*slew rate*) e uma base de curta duração após o pulso. O pulso em rampa teria como função a diminuição de ruído sonoro [39]. A base pós-pulso teria como função evitar que a transferência da gota metálica se dê durante a fase negativa e, conseqüentemente, a repulsão e produção de respingos [23, 24].

Os parâmetros Ip, tp, Ib e tb, mostrados na Figura 17, têm funções idênticas aos do processo MIG/MAG Pulsado CC+. A base negativa formada por In (corrente de base negativa) e tn (tempo de base negativa) é introduzida para incorporar ao processo as características, já citadas, de menor calor imposto à peça e maior taxa de fusão.

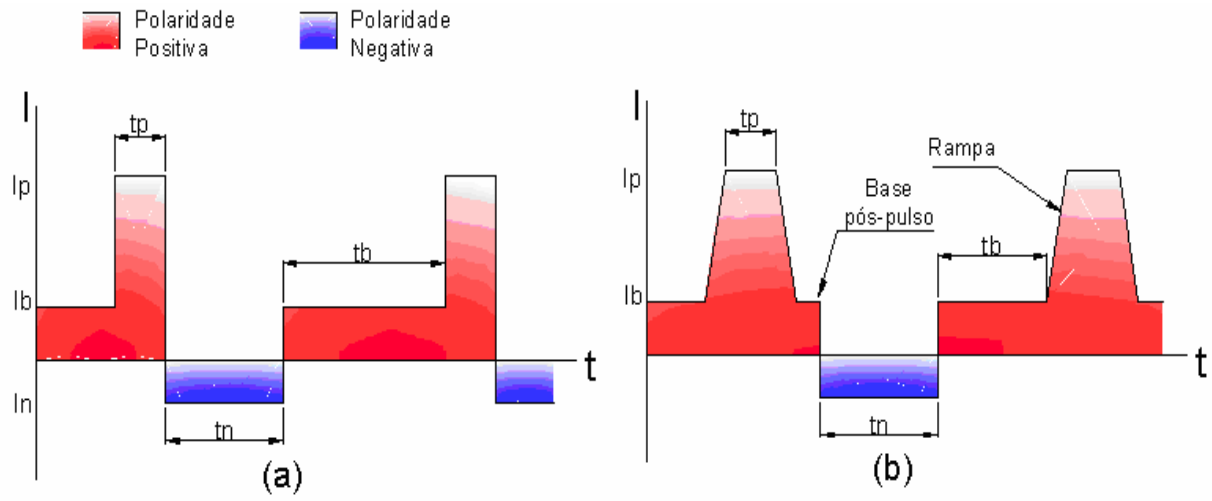


Figura 17 – Formatos de onda de corrente para MIG/MAG Pulsado CA: (a) Formato de onda retangular; (b) Formato de onda trapezoidal.

A Figura 18 mostra a escalada do arco durante a fase negativa de corrente. Em (a), o arco está em na fase de pulso, com grande energia para realizar o destacamento da gota, enquanto em (b) está na transição da fase de pulso para a fase negativa de corrente. Em (c), a intensidade luminosa do arco se reduz consideravelmente, indicando a fase de menor energia, sendo que o arco já está ancorado na parte sólida do eletrodo. No último quadro (d), a transição está completa com o processo em plena fase negativa de corrente. É possível notar também que já ocorre a formação de uma nova gota, mostrando a influência da polaridade negativa sobre este aspecto.

A Figura 19 mostra a interface gráfica do Sistema Avançado de Controle (ver Capítulo 3, item 3.1.2), onde está programado um formato de onda de corrente sugerido por Santos [36]. Este formato de onda foi utilizado em seu trabalho para a soldagem de alumínio e contempla a fase de pulso em rampa, base de pós-pulso e a presença de pequenos picos de corrente antes de cada transição. A idéia básica é que o aumento de tensão causado por estes picos de corrente auxilie na re-ignição do arco após a transição de uma polaridade para outra.

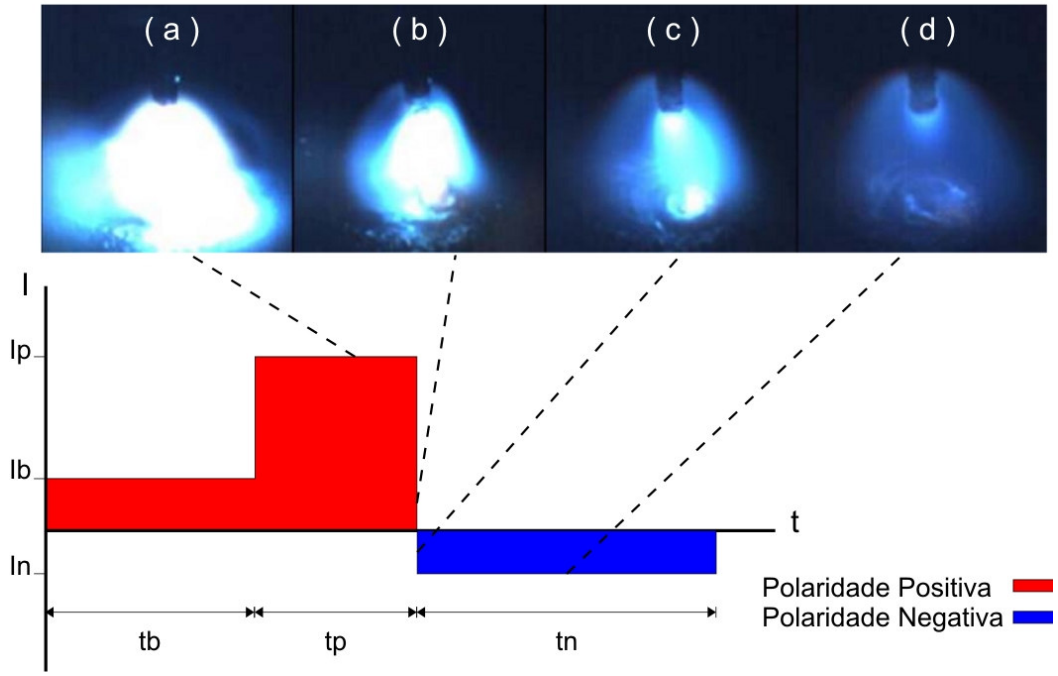


Figura 18 - Escalada do arco voltaico durante a fase negativa [36].

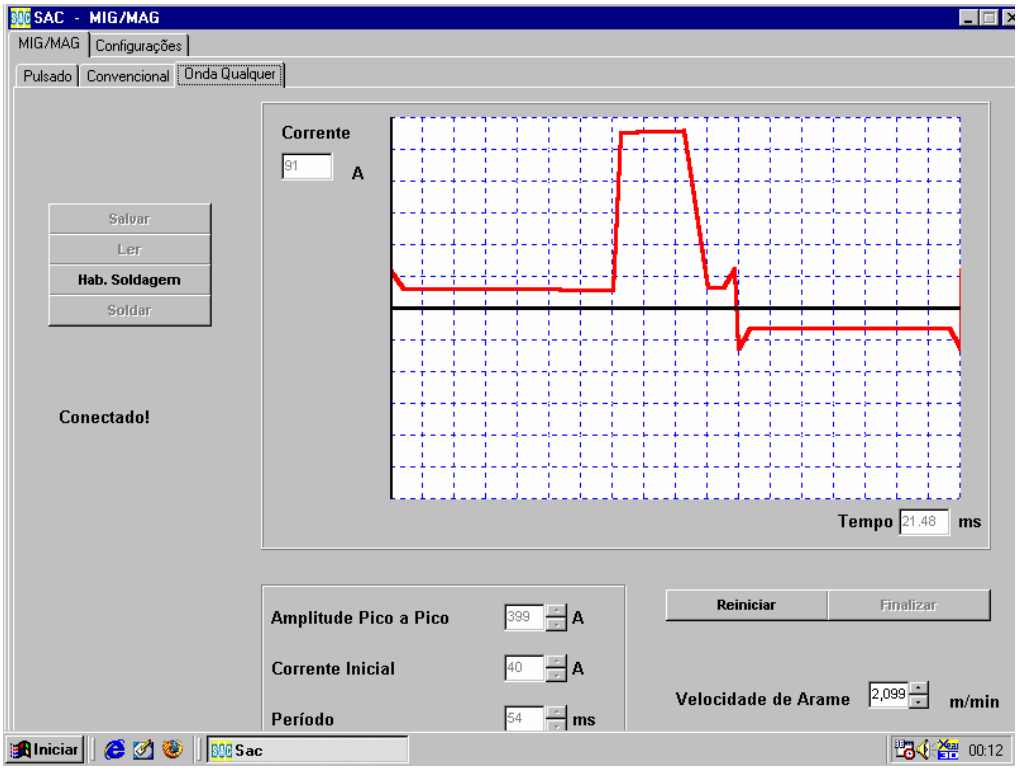


Figura 19 - Tela do Sistema Avançado de Controle com formato de onda de corrente programada para a soldagem do alumínio com MIG Pulsado CA.

Alguns resultados do emprego deste formato de onda no alumínio são apresentados na Figura 20, onde %EN corresponde ao percentual de tempo despendido da fase de polaridade negativa em relação ao período total do ciclo, caracterizado pela Equação (7). Corrente média absoluta e taxa de fusão são calculadas a partir das Equações (8) e (9) respectivamente, e como não poderia deixar de ser, incorporam também os parâmetros In e tn. Observa-se que nas Equações (8) e (9) o valor In é apresentado em módulo (valor absoluto). O coeficiente de fusão K (apresentado anteriormente na Equação (6)) agora é considerado separadamente para cada polaridade, sendo K(+) o coeficiente de fusão positivo e K(-) o negativo.

$$\%EN = \frac{tn}{tn + tp + tb} \tag{7}$$

$$\mathrm{Im}_a = \frac{Iptp + Ibtb + |In|tn}{tp + tb + tn} \tag{8}$$

$$Tf = \frac{IptpK(+) + IbtbK(+) + |In|tnK(-)}{tp + tb + tn} \tag{9}$$

Analisando os dados presentes na Figura 20, constata-se que foi possível manter a taxa de fusão constante (3,1 m/min – 51,67 mm/s) com a diminuição de corrente média absoluta que ocorre à medida que se aumenta %EN (percentual de eletrodo negativo). Isto é possível, pois o coeficiente K(-) é sempre maior na polaridade negativa, de forma que quanto maior o tempo despendido nesta, maior a taxa de fusão. Assim, manipulando os parâmetros pode-se manter uma mesma velocidade de alimentação de arame, mesmo com a diminuição da corrente média absoluta. O efeito disto associado à maior ação da polaridade negativa sobre a solda é nítido, causando um estreitamento cada vez maior do cordão e diminuindo a área da zona fundida e a penetração de solda. Santos [36] determinou experimentalmente coeficientes de fusão para arames de aço e de alumínio, conforme é dado pela Tabela 1.

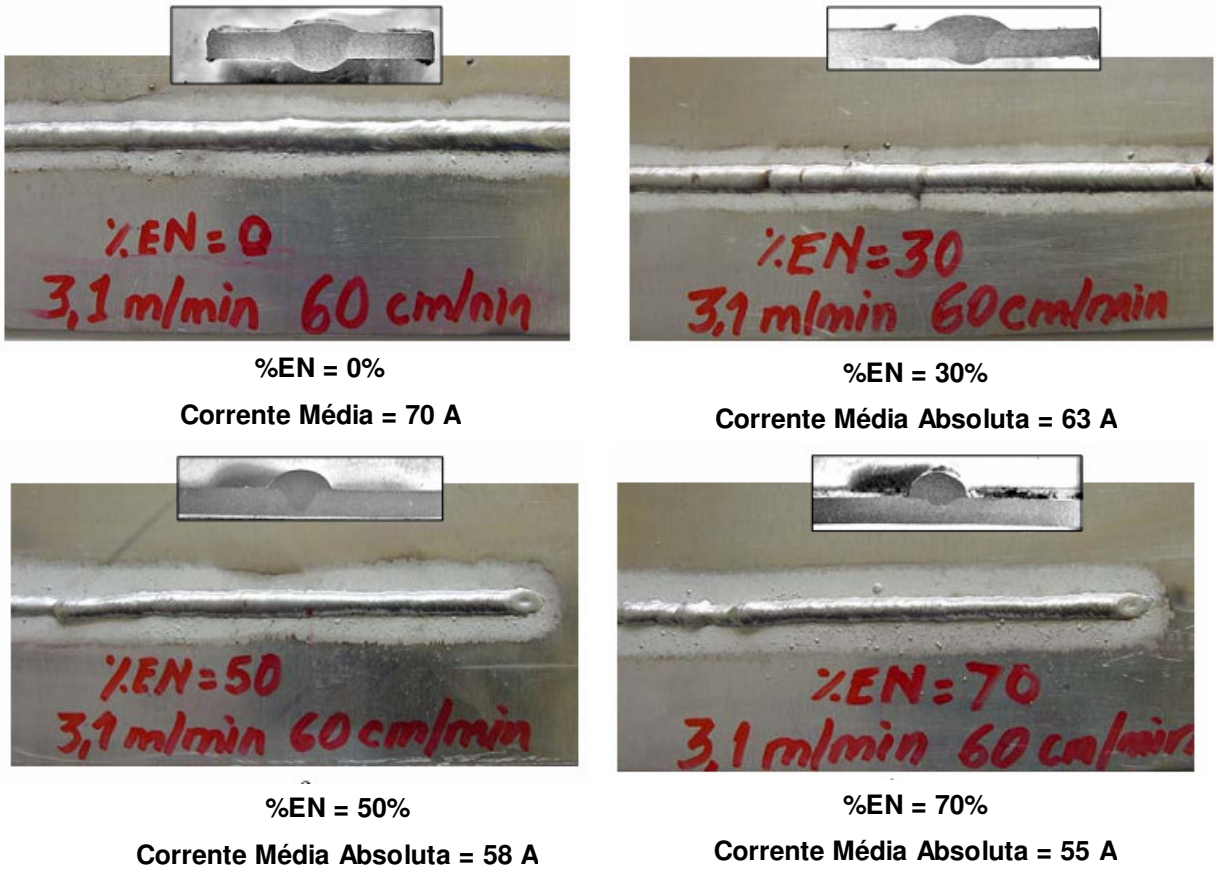


Figura 20 - Cordões de solda sobre chapas de alumínio 1200, utilizando processo MIG Pulsado CA [36].

Tabela 1 – Coeficientes de Fusão para cada polaridade para arames de aço e alumínio.

	Coeficientes de fusão K [$m.\min^{-1}.A^{-1}$]	
Arame, diâmetro, gás de proteção	**Positivo K(+)**	**Negativo K(-)**
Aço - ER 70S-6, 1,2 mm, Argônio + 8% CO_2	0,026	0,032
Alumínio - ER 4043, 1,2 mm, Argônio	0,044	0,095

Esta versatilidade estende o campo de atuação do processo pulsado a soldagem de chapas de alumínio de espessuras finas (1 mm ou menos), no preenchimento de juntas com grande espaçamento "*gap*" [23, 24, 43] ou em aplicações onde a menor energia de soldagem imposta

a peça é vantajosa, como por exemplo, na soldagem de reparo de tubulações em regime de funcionamento [36] e na união de chapas de aço galvanizado [44].

2.3.3 Soldagem do alumínio com MIG Pulsado

Para a união de componentes de estruturas metálicas em alumínio, a soldagem a arco é, geralmente, o método escolhido. Mais especificamente, o processo MIG (ou uma de suas variantes), é escolhido, devido à alta produtividade e a facilidade de automação, quando for o caso. Entretanto, a soldagem MIG do alumínio pode ser um desafio, especialmente na utilização do modo pulsado aplicado à juntas de filete. A obtenção de cordões de solda com acabamento satisfatório e boa estabilidade de arco durante a operação de soldagem neste tipo de junta é difícil devido a problemas inerentes ao processo, que se verificam na prática, como:

- Pelas características do processo com pulsação de corrente e principalmente da geometria da junta, o arco voltaico espalha-se pelas faces das chapas que formam o filete, muitas vezes causando excesso de fusão nas faces e falta de fusão na raiz da solda;
- Podem ocorrer oscilações no comprimento do arco, que ora arde próximo ao bico de contato, ora torna-se tão curto a ponto de causar uma série de curtos-circuitos. No primeiro caso, o arco espalha-se de tal forma que não ocorre o aquecimento do metal de solda e preenchimento adequado da junta. No segundo caso, ocorre a produção de respingos comprometendo o aspecto dos cordões de solda e a qualidade da junta. Geralmente, após estas perturbações o arco voltaico não mais recupera seu comprimento inicial.

Estes problemas tornam-se mais evidentes no caso de soldagens automatizadas em linhas de produção, onde não há a presença do soldador para tentar corrigir as variações. Para compensar isto, sistemas de monitoração dedicados a manter o comprimento de arco constante durante a soldagem MIG foram desenvolvidos, tais como o mostrado por Essers e Van Gompel [45]. Em seu trabalho, estes pesquisadores sugerem a utilização da tensão medida durante o pulso como o indicativo mais adequado do comprimento de arco. Neste sistema, o valor de tensão medido durante o pulso é constantemente comparado a um valor padrão ajustado. O controle atua somente na duração do tempo de base e, por conseguinte na

freqüência de pulsação. Isto incorre em uma alteração na taxa de fusão de arame-eletrodo, para mais ou para menos, conforme a necessidade.

A escolha da medição da tensão durante o pulso é justificada devido à existência de um maior número de pontos de emissão de elétrons nesta fase, quando comparados ao número existente durante o período de base, comprovado por filmagens de alta velocidade. Os pontos de emissão circundam a poça de fusão e, segundo os autores, produzem uma leitura mais precisa do real comprimento de arco.

2.3.4 Gases de proteção empregados na soldagem MIG do alumínio

Os gases mais utilizados na soldagem do alumínio são argônio e hélio. Estes são gases inertes, ou seja, não reagem e não têm efeito sobre a composição química do metal soldado [46]. As principais diferenças físicas entre hélio e argônio são: a condutividade térmica, a densidade e o potencial de ionização [15]. O hélio possui maior condutividade térmica [47] e possivelmente, por este motivo, produzirá uma poça de fusão mais fluída, melhorando a molhabilidade do metal de solda sobre a superfície da peça de trabalho.

A densidade do argônio é 1,4 vezes maior do que a do ar atmosférico. Para o hélio, esta relação está em torno de 0,14 vezes. Quando comparado com o argônio, a utilização de hélio puro pode exigir o emprego de maiores vazões de gás, para realizar uma proteção efetiva da poça de fusão [15].

Nas mesmas condições de soldagem, o hélio caracteriza-se por uma maior dificuldade na ignição do arco voltaico quando comparado à utilização do argônio como gás de proteção. Isto se deve ao alto potencial de ionização do hélio (24,58 V) em relação ao argônio (15,75 V) [10]. Isto é, a barreira de energia a ser vencida, para que ocorra a ionização do gás de proteção, é significantemente maior no hélio [48].

Misturas de argônio com uma quantidade menor de hélio são comumente empregadas para obter-se um gás de proteção com características intermediárias. Contudo, a utilização de gases inertes não produz uma ação de estabilização sobre a poça de fusão e durante a soldagem e ocorre a formação de múltiplas manchas catódicas sobre as adjacências da poça de fusão, buscando pontos nos quais a emissão de elétrons seja favorecida pela presença de

óxidos. Na soldagem MIG/MAG de aços, é recomendável a utilização de misturas de gases inertes com gases ativos como o CO_2, por exemplo, com o intuito principal de produzir um arco mais estável. A maior estabilidade deve-se ao fato de o oxigênio, produzido na decomposição do CO_2, reagir com o material da poça de fusão, criando sobre esta um filme de óxidos. A oxidação da poça de fusão limita a ação das manchas catódicas sobre áreas adjacentes a poça de fusão, pois os óxidos estão presentes diretamente sobre a mesma. Visando conseguir um efeito estabilizador semelhante na soldagem MIG do alumínio, O_2 pode ser adicionado ao argônio em percentuais muito pequenos, suficiente para aumentar estabilidade, mas não ao ponto de causar oxidação excessiva da poça de fusão [25].

Assim como no processo TIG CA, na soldagem MIG do alumínio, a mobilidade da mancha catódica assiste a remoção do óxido de alumínio sobre a superfície da peça a ser soldada (limpeza catódica). Este fenômeno deixa uma faixa opaca nas regiões próximas ao metal de solda (faixa de limpeza catódica) que, em alguns casos, faz com que a aparência geral da solda deixe a desejar. No caso de soldagens automáticas, onde a oscilação de distância bico de contato-peça (DBCP) é muito pequena, esta faixa de limpeza catódica pode também ser um indicativo da oscilação de comprimento de arco durante a operação de soldagem. A diminuição na largura da faixa opaca ao longo do cordão de solda da Figura 21 corresponde a uma aproximação do arco sobre a região de solda, em conseqüência da diminuição de comprimento de arco durante a operação de soldagem.

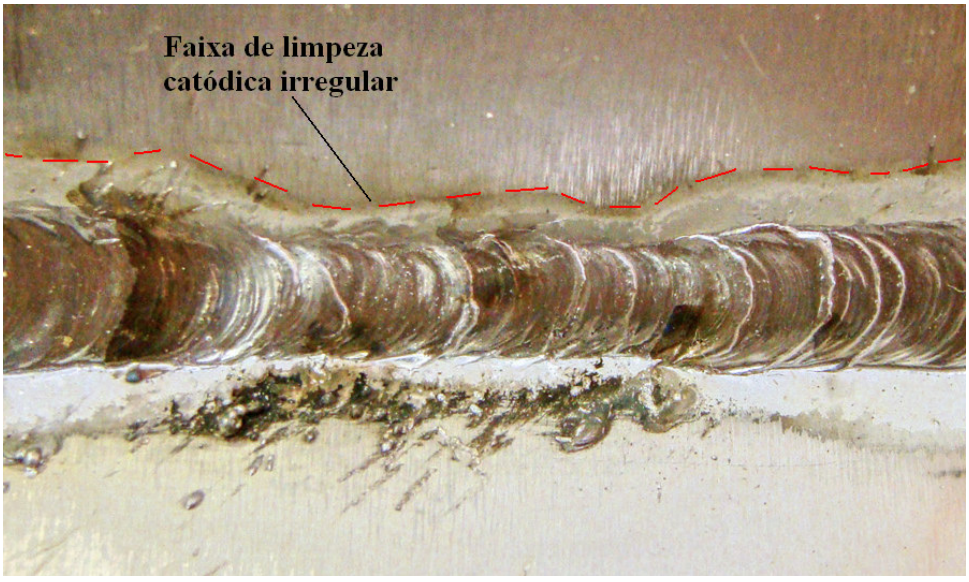


Figura 21 - Indício de variação do comprimento de arco: irregularidade na faixa de limpeza catódica ao longo do cordão de solda.

CAPÍTULO 3

Materiais e Métodos

3.1 Aparato experimental

Este item tem por objetivo apresentar uma visão geral dos equipamentos utilizados durante o desenvolvimento deste trabalho. Aspectos mais relevantes a um determinado grupo de experimentos serão mostrados diretamente na explanação sobre os procedimentos experimentais. A Figura 22 mostra a bancada de ensaios e os sistemas com os quais se realizou medição e controle.

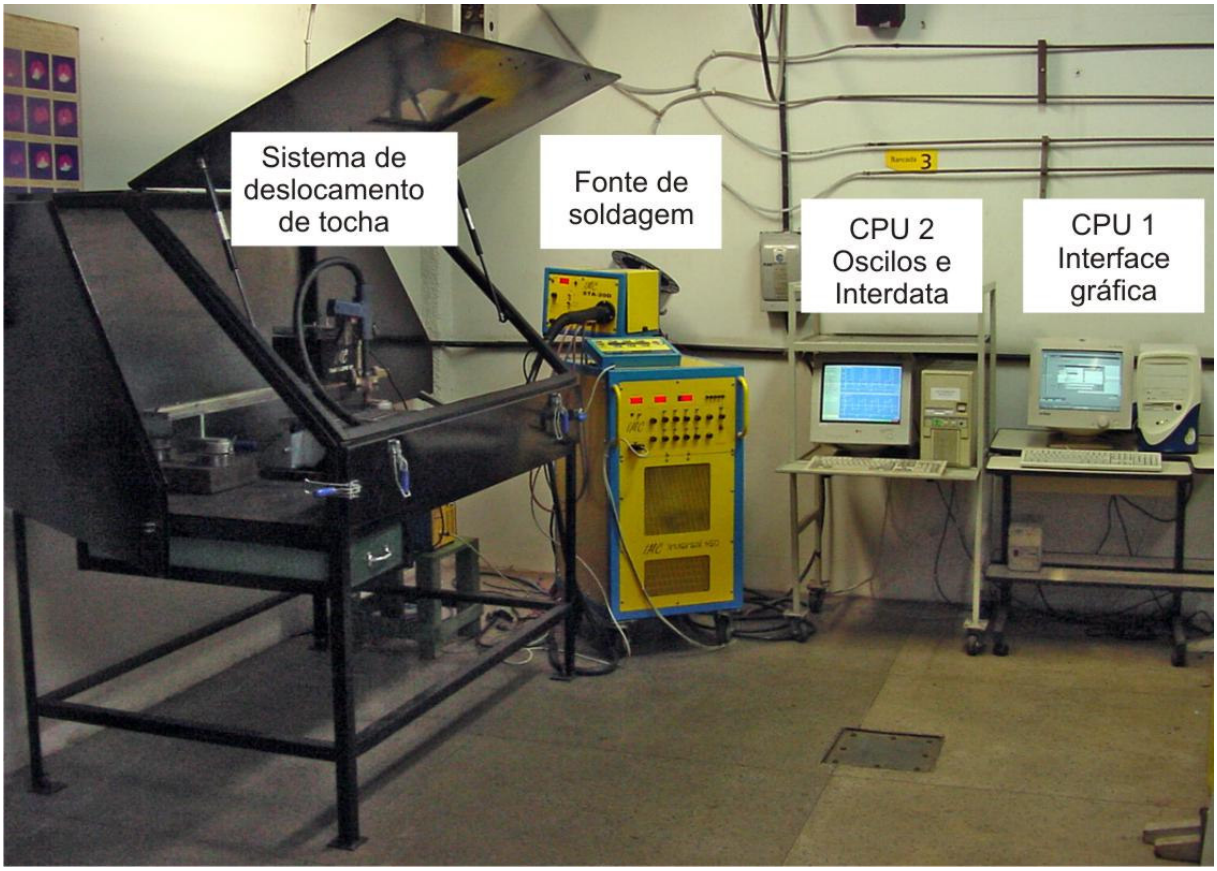


Figura 22 - Visão geral da bancada de ensaios.

3.1.1 Fonte de soldagem

A fonte de soldagem utilizada nesses experimentos foi a INVERSAL 450 [49] (Figura 23), fabricada pela empresa IMC Soldagem. É uma fonte que pode trabalhar com os processos TIG, MIG/MAG, Plasma e Eletrodo revestido, tanto em CC, com em CA com grande variedade de opções de regulagem. Além disso, possui entrada para controle remoto [50], o que permite o uso dos sistemas de controle de formato de onda de corrente e aquisição de dados citados no próximo item. Nesta fonte foi instalado um circuito de pulso especialmente projetado para a utilização do processo MIG/MAG na condição CA que, durante cada mudança de polaridade, aplica um pulso de alta tensão (próximo de 600 V) por curtíssimo tempo com o fim de auxiliar a re-ignição do arco na transição [36].

Figura 23 – Fonte de Soldagem Inversal 450/IMC.

3.1.2 Sistema Avançado de Controle

O Sistema Avançado de Controle (SAC) [51, 52] é uma plataforma de apoio à pesquisa e desenvolvimento de soluções novas para a área de processos de soldagem. Sua concepção se deu inteiramente dentro do LABSOLDA/UFSC e surgiu da necessidade do laboratório de conduzir pesquisas nos mais diversos processos de soldagem sem que ficasse dependente de equipamentos fornecidos pelos fabricantes de fontes de soldagem. Em geral, esses

equipamentos são destinados ao uso em linhas de produção de modo que possuem painéis de comando bastante simples, onde constam opções de intervenção extremamente necessárias [51]. Isto limita a intervenção em diversos aspectos de seu funcionamento e restringe o pesquisador a aspectos pré-estabelecidos pelo fabricante. Portanto, o SAC surgiu como uma alternativa para viabilizar a evolução científica na área de processos de soldagem.

O SAC é constituído por quatro componentes básicos: uma interface gráfica com o usuário, o sistema de aquisição OSCILOS, a placa condicionadora de sinais Interdata e a própria fonte de soldagem (atuador do sistema). A disposição física do Sistema Avançado de Controle é apresentada na Figura 24, sendo que cada microcomputador (CPU 1 e CPU 2) executa um determinado aplicativo.

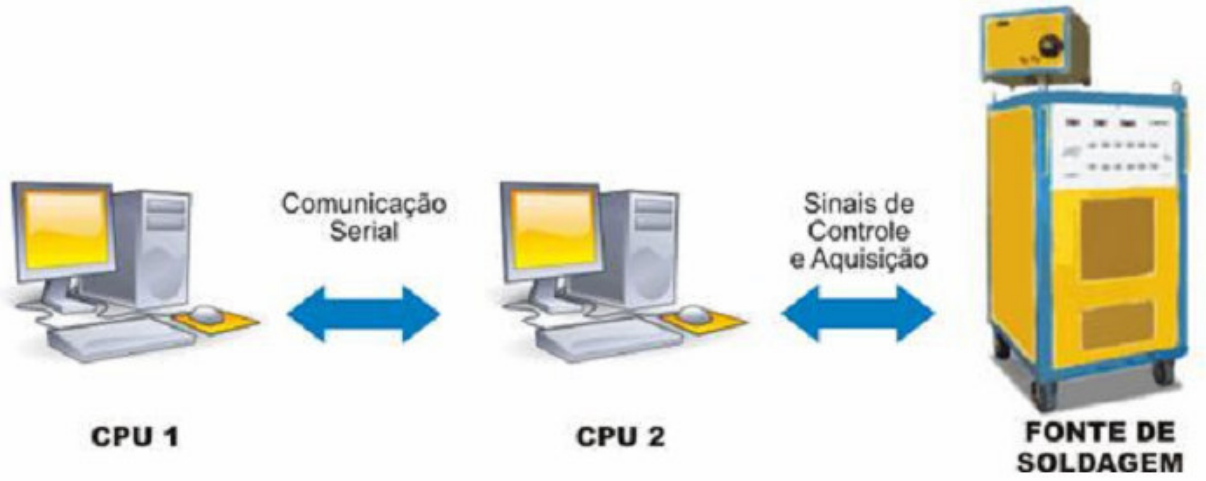


Figura 24 - Disposição física do SAC [51].

A Figura 25.a apresenta o modelo de interface gráfica para ambiente Windows (CPU 1) que serve de interface ao usuário e permite, entre outras funções, desenhar um formato de onda de corrente, o que viabiliza qualquer pesquisa envolvendo formatos de onda não disponíveis em fontes comerciais.

O OSCILOS (Figura 25.b), também desenvolvido no LABSOLDA/UFSC, é um aplicativo para plataforma MS-DOS (roda na CPU 2) que emula um osciloscópio, permitindo a aquisição e registro dos valores de tensão e de corrente e sua apresentação em forma gráfica.

A placa INTERDATA, mostrada na Figura 25.c, possui conectores compatíveis com microcomputadores da linha IBM-PC e é o meio de comunicação entre o OSCILOS e o

processo de soldagem. É capaz de receber dados (para aquisição pelo OSCILOS) e enviar dados (para controlar a fonte de soldagem, reproduzindo o formato de onda desenhado na interface gráfica).

O SAC foi utilizado apenas nos experimentos com as modalidades MIG Pulsado CC+ e CA, tanto para o controle da fonte de soldagem quanto para a aquisição de dados.

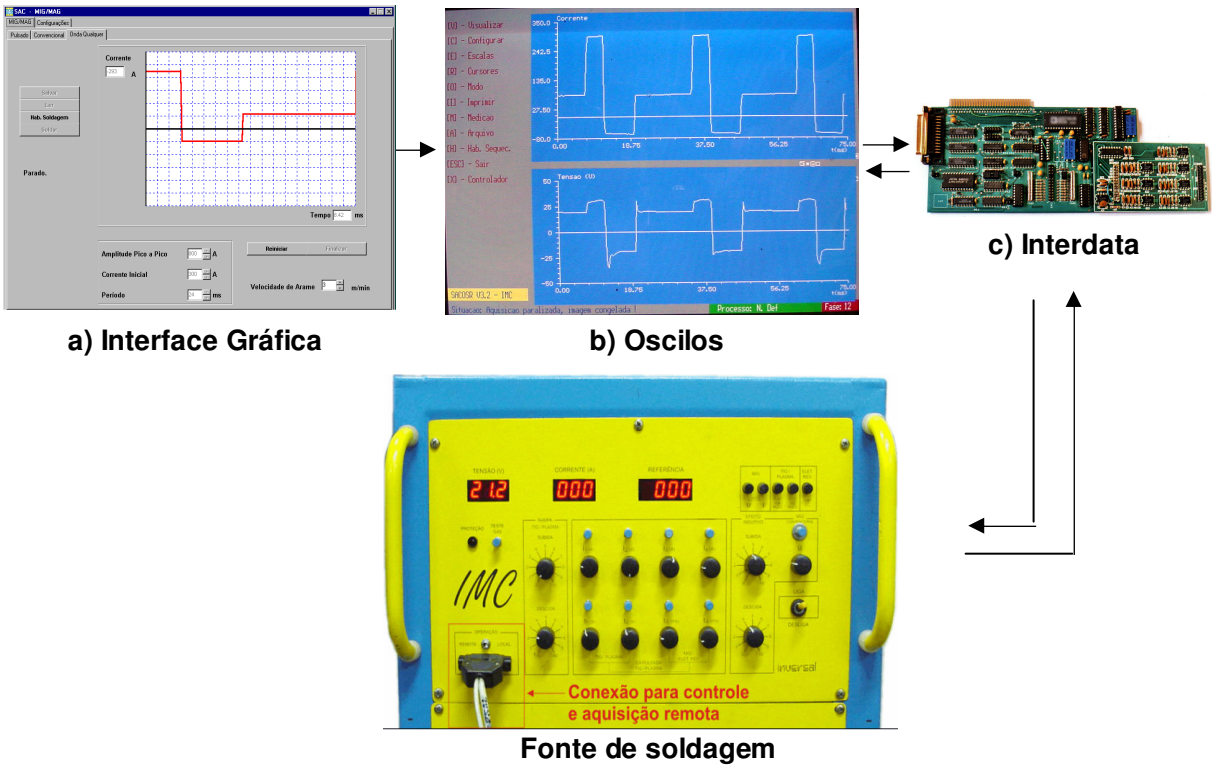


Figura 25 - Principais elementos do SAC.

3.1.3 Sistema de Aquisição Portátil

O Sistema de Aquisição Portátil (SAP) [53] foi utilizado para a captura dos sinais de corrente e tensão em ensaios envolvendo os processos TIG CA e MIG/MAG Convencional CC+/CC- (Figura 26). Este sistema é constituído de uma placa de aquisição, baterias, transdutor de velocidade de arame, sensor Hall para medição de corrente, cabos para medição de tensão e um microcomputador portátil para executar os aplicativos (neste caso, o OSCILOS) e armazenar os dados recolhidos durante os ensaios.

Figura 26 - Sistema de Aquisição Portátil (SAP).

3.1.4 Sistema de Deslocamento de Tocha

O sistema de deslocamento de tocha utilizado foi o Tartílope V1 [54] (Figura 27), fabricado pela IMC, cujas especificações básicas são:

- Velocidade: 5,0 a 160,0 cm/min (0,83 mm/s a 26,67 mm/s);
- Posicionamento: 0 a 9999 mm;
- Eixos de movimentação: 1.

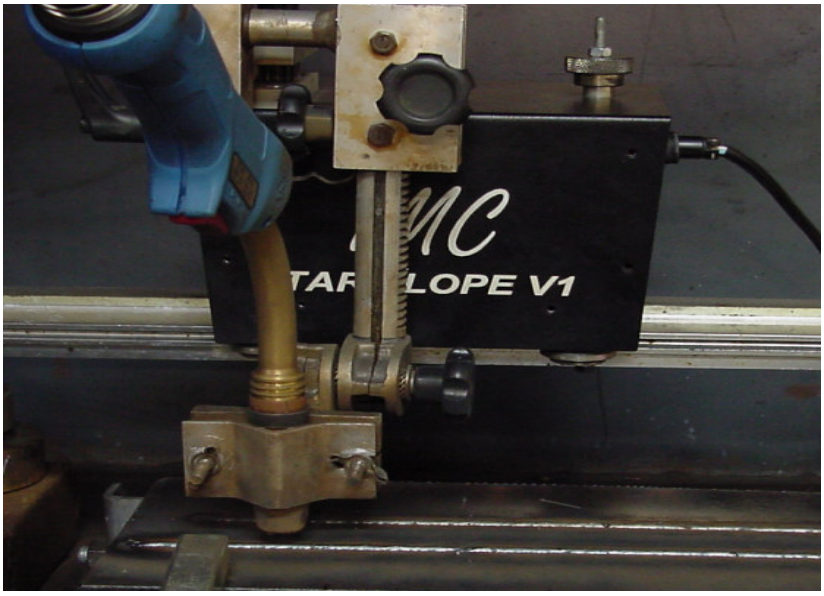


Figura 27 - Sistema de deslocamento de Tocha.

3.2 Procedimentos Experimentais

Este item apresenta os procedimentos experimentais e materiais utilizados para cada grupo de experimentos, especificamente. Neste trabalho há quatro grupos de experimentos, divididos de acordo com o assunto específico que foi abordado e com o processo de soldagem que estava sendo estudado. Para cada grupo de experimentos foi dado um título para identificá-lo durante a exposição dos resultados no capítulo seguinte.

Grupo 1: Influência do tempo de atuação da polaridade positiva na soldagem TIG CA do alumínio;

Grupo 2: Influência da intensidade da corrente positiva na soldagem TIG CA do alumínio;

Grupo 3: Influência da polaridade nas características dos cordões de solda e no comportamento do arco na soldagem MIG/MAG de aços ao carbono;

Grupo 4: Avaliação do desempenho das modalidades MIG Pulsado CC+ e CA na soldagem de juntas de alumínio em filete

3.2.1 Procedimentos experimentais do Grupo 1: Influência do tempo de atuação da polaridade positiva na soldagem TIG CA do alumínio

Utilizando o processo TIG CA, foram realizadas soldas sobre chapas de alumínio, com o intuito de verificar o efeito do aumento do tempo de polaridade positiva sobre a limpeza catódica, dimensões da zona fundida e tensão do arco. Foi definido um Percentual de Eletrodo Positivo (%EP), que é tempo de polaridade positiva sobre o período da onda de corrente, expresso pela Equação (10) onde: t(+) e t(-) correspondem ao tempo de polaridade positiva (ms) e o tempo de polaridade negativa (ms), respectivamente. Estes tempos de atuação, tanto da polaridade negativa, quanto da polaridade positiva, são dados pela Tabela 2, sendo realizados três repetições para cada combinação de parâmetros. As intensidades de corrente foram reguladas em 100 A, tanto para a fase positiva quanto para a fase negativa, o que resultou em uma corrente eficaz (Ief) de 100 A. O período foi de 20 ms em um formato de onda retangular.

$$\%EP = \frac{t(+)}{t(+) + t(-)} x100 \tag{10}$$

Tabela 2 - Parâmetros de soldagem para os ensaios variando o Percentual de Eletrodo Positivo (%EP).

%EP	t(+) [ms]	t(-) [ms]
6,5%	1,3	18,7
10%	2,0	18,0
20%	4,0	16,0
35%	7,0	13,0
50%	10,0	10,0

O tipo de eletrodo utilizado foi o EWTh-2, com diâmetro de 3,2 mm e ângulo de afiação de 45°. Após cada solda o eletrodo era substituído ou novamente afiado em equipamento apropriado e que utiliza rebolo diamantado para afiação. Argônio comercialmente puro foi utilizado como gás de proteção a uma vazão de aproximadamente 7 l/min. O ângulo entre o eletrodo e a peça de trabalho foi de 90°, a DEP foi de foi de 3 mm e a velocidade de soldagem foi de 3,33 mm/s (20 cm/min).

Os corpos de prova de alumínio 1200 tiveram as seguintes dimensões: 240 mm x 100 mm e 3 mm de espessura. A composição química nominal deste metal é apresentada na Tabela 3 [55]. Todos os cordões de solda tiveram o comprimento aproximado de 200 mm. Os corpos de prova receberam apenas uma limpeza simples com tecido embebido em álcool. Posteriormente, estes foram seccionados transversalmente ao cordão de solda na metade de seus comprimentos (100 mm a partir de qualquer extremidade), para retirada de amostras e realização de macrografias. Os ataques foram realizados com ácido fluorídrico 5% em todas as amostras.

Tabela 3 – Composição Química Nominal do Alumínio 1200 [55].

Al [1]	Si+Fe [2]	Cu [2]	Mn [2]	Zn [2]	Ti [2]	Outros [2]
99,0%	1,0%	0,05%	0,05%	0,10%	0,05%	0,05-0,15%

[1] Percentagem mínima de alumínio. [2] Percentagem máxima para estes elementos.

O SAP foi utilizado para capturar os sinais de corrente e tensão em cada experimento. Com este sistema de aquisição também foi realizado o cálculo da Potência Média (Pm), da Corrente Eficaz e da Tensão Eficaz (Uef) do processo. Neste sistema, a Potência Média é calculada valendo-se da Equação (11). O tempo e a freqüência de aquisição foram de 2 segundos e 5 kHz, respectivamente.

$$Pm = \frac{\sum_{i=1}^{n} U_i I_i}{n} \tag{11}$$

Onde:

U_i = Tensão no instante *i*.

I_i = Corrente no instante *i*.

n = Número de pontos capturados pelo sistema.

Com a finalidade de estabilizar a condição do eletrodo e formar a poça de fusão, o deslocamento da tocha era realizado somente após cerca de 5 s de arco aberto. Estes cuidados permitiram a produção de cordões de solda de largura mais uniforme de uma extremidade à outra.

3.2.2 Procedimentos experimentais do Grupo 2: Influência da intensidade da corrente positiva na soldagem TIG CA do alumínio

Utilizando o processo TIG CA, foram realizados cordões de solda sobre chapa de forma automatizada, com o objetivo de determinar o efeito do aumento da intensidade da corrente de soldagem durante as fases positivas sobre a limpeza catódica, dimensões da zona fundida e tensão do arco. A Tabela 4 mostra os valores de teste utilizados, onde I(+) e I(-) são as intensidades da corrente durante as fases positivas e negativas, respectivamente. A corrente positiva I(+) foi arbitrada, enquanto a corrente negativa I(-) foi calculada por intermédio da Equação 12, de modo a resultar em um valor de corrente eficaz (*Ief*) de 100 A, em um formato de onda de corrente retangular. Os tempos de duração da fase positiva e negativa foram regulados em 10 ms, em todos os ensaios. Três cordões de solda foram realizados para cada combinação de parâmetros, mostrada na Tabela 4, perfazendo três séries de ensaios.

Os demais aspectos, relacionados ao sistema de aquisição, corpos de prova, preparação de amostras, condições de soldagem e outros, são idênticos àqueles relatados no item 3.2.1.

$$I(-) = \sqrt{2Ief^2 - I(+)^2} \tag{12}$$

Tabela 4 – Parâmetros de soldagem para os ensaios variando as Intensidades de Corrente Negativa e Positiva.

I(+) [A]	I(-) [A]
35	137
50	132
65	126
80	116
100	100

3.2.3 Procedimentos experimentais do Grupo 3: Influência da polaridade nas características dos cordões de solda e no comportamento do arco na soldagem MIG/MAG de aços ao carbono

Neste grupo, o principal objetivo foi avaliar a influência da polaridade na soldagem MIG/MAG com corrente contínua de aços ao carbono sobre os seguintes aspectos: comportamento do arco, características geométricas e aparência superficial do cordão de solda.

O arame utilizado foi o ER 70S-6, com diâmetro de 1,2 mm. Os corpos de prova foram de aço comum ao carbono (SAE 1010/1020) e tiveram as seguintes dimensões: 240 x 100 x 9,8 mm. Foi utilizada uma mistura de 98% Ar + 2% O_2, como gás de proteção, a uma vazão de 12 l/min. A tocha de soldagem foi posicionada perpendicularmente ao corpo de prova e foi mantida uma DBCP de 25 mm para todos os experimentos.

Todas as soldas foram por deposição sobre chapa com tocha conduzida pelo sistema Tarílope V1. O Sistema de Aquisição Portátil foi utilizado para o registro dos sinais de tensão e corrente e realização do cálculo de seus valores eficazes (Uef e Ief), a partir dos dados coletados. O tempo de aquisição foi de 2 segundos e a freqüência de aquisição de 5 kHz.

A fonte de soldagem foi regulada para operar no modo tensão constante em todos os ensaios. A velocidade de alimentação de arame foi regulada de modo a resultar em uma corrente de 260 A (típica de transferência metálica goticular). Para garantir este valor de corrente, foi necessário realizar testes preliminares para determinar a velocidade de alimentação de arame correta em cada polaridade, sendo que apenas os ensaios que melhor se aproximaram da corrente de soldagem estabelecida foram aproveitados e serão apresentados durante a discussão dos resultados.

A Tabela 5 apresenta as condições para o ensaio definitivo e a velocidade de alimentação de arame (Va) e de soldagem (Vs) assim como os valores eficazes de corrente e tensão para cada um destes. A relação velocidade de alimentação de arame / velocidade de soldagem, Equação (13), foi respeitada no teste (c). Desta forma, teve-se a comparação entre as duas polaridades em velocidades de soldagem iguais e em uma velocidade de soldagem equivalente ao aumento da taxa de fusão originada pela utilização de CC-.

$$\frac{Va}{Vs} = 25 \tag{13}$$

Tabela 5 - Parâmetros de soldagem para os ensaios realizados em diferentes condições de polaridade e velocidade de soldagem.

Teste	Condição	Velocidade de alimentação de arame	Velocidade de soldagem	Tensão Eficaz	Corrente Eficaz
(a)	CC+	125,0 mm/s (7,5 m/min)	5 mm/s (30 cm/min)	31 V	259 A
(b)	CC-	191,7 mm/s (11,5 m/min)	5 mm/s (30 cm/min)	30 V	263 A
(c)	CC-	191,7 mm/s (11,5 m/min)	7,6 mm/s (46 cm/min)	30 V	259 A

Posteriormente, os corpos de prova foram seccionados transversalmente, aproximadamente na metade do comprimento total de cada cordão de solda para a realização de macrografias. O ataque foi realizado com reativo de iodo (iodo sublimado 10 g, iodeto de potássio 20 g, água destilada 100 g).

Foi feito registro fotográfico do arco para avaliar o comportamento deste em cada polaridade. Estas fotografias foram conduzidas separadamente por praticidade, porém, nas mesmas condições da Tabela 5. Para tal, foi utilizada uma câmera digital comum com um filtro acoplado à lente e postada de frente para a tocha de soldagem. Um canhão de laser localizado atrás da tocha de soldagem foi direcionado para a ponta do eletrodo, de modo que quando iniciada a soldagem, o laser evidenciava o perfil do eletrodo, tornando-o mais nítido nas fotografias. Neste caso, especificamente, ao invés da tocha movimentar-se, foi empregado um sistema na qual o corpo de prova foi movimentado com uma velocidade regulada, enquanto a tocha mantinha sua posição, o que facilitou a obtenção de foco nas fotografias.

3.2.4 Procedimentos experimentais do Grupo 4: Avaliação do desempenho das modalidades MIG Pulsado CC+ e CA na soldagem de juntas de alumínio em filete

Neste grupo de experimentos, o foco de atenção esteve em uma situação comumente encontrada na prática, que é a soldagem de juntas de filete. Neste grupo de experimentos, em especial, foi testado o desempenho dos sistemas MIG Pulsado CC+ e CA, no que diz respeito a questão da estabilidade. Além da estabilidade aspectos como aparência superficial e características da zona fundida também foram analisados.

Tentando tornar este estudo mais amplo, três gases de proteção foram utilizados: Ar Puro, 75% Ar + 25% He e Ar + 0,2% O_2, sendo que os dois primeiros são gases disponíveis comercialmente. A mistura Ar + 0,2% O_2 foi fabricada especialmente para este ensaio e fornecido pelo fabricante com respectivo certificado de análise química. O efeito esperado para este último é que o pequeno conteúdo de O_2 ajudasse a inibir a oscilação de comprimento de arco que comumente ocorre durante a soldagem MIG do alumínio. Este gás foi utilizado apenas na condição CC+ pois os resultados não foram bons para CA devido à grande instabilidade do arco e seu uso nesta condição foi abandonado.

Para os corpos de prova, peças de 300 mm x 80 mm foram retirados de uma mesma chapa de alumínio 1200, de espessura 2 mm. O arame-eletrodo utilizado foi o ER 4043 de 1,2 mm de diâmetro. Após a realização do ensaio, cortes transversais aos cordões de solda foram realizados, para a obtenção de macrografias e análise das superfícies fundidas. O reagente utilizado foi ácido fluorídrico 5%. Em cada teste, uma tocha de soldagem comum (sem sistema tipo *push-pull*) foi posicionada de forma a manter um ângulo de aproximadamente 45° com as faces da junta e a técnica empurrando foi utilizada em todos os ensaios.

Todos os experimentos, tanto na condição CC+ quanto CA, foram conduzidos com o auxílio do SAC sem nenhum sistema de controle de comprimento de arco. Para cada combinação processo / gás de proteção, foram realizadas três repetições, sendo que a Tabela 6 apresenta a velocidade de alimentação de arame e de soldagem. Os formatos de onda de corrente são apresentados na Figura 28. Para facilitar as análises e tornar mais válida as conclusões, manteve-se constante a relação velocidade de soldagem / velocidade de arame, Equação (14).

$$\frac{Vs}{Va} = 9{,}4 \tag{14}$$

A corrente média foi de 70 A para a condição CC+ e a corrente média absoluta foi de 80 A para CA. Com o emprego de uma corrente média maior para o processo MIG na condição CA tenta-se compensar a menor imposição de calor à peça, já que o objetivo, neste caso, é buscar o melhor desempenho possível para o processo.

Tabela 6 - Condições de soldagem para o ensaio do Grupo 4.

Modalidade	Gás de Proteção	Velocidade de alimentação de arame	Velocidade de soldagem
MIG Pulsado CC+	Ar Puro	55 mm/s (3,3 m/min)	5,83 mm/s (35 cm/mim)
	Ar +25% He.	58,3 mm/s (3,5m/min)	6,17 mm/s (37 cm/min)
	Ar + 0,2% O_2	55 mm/s (3,3 m/min)	5,83 mm/s (35 cm/mim)
MIG Pulsado CA	Ar Puro	68,3 mm/s (4,1 m/min)	7,25 mm/s (43,5 cm/min)
	Ar +25% He.	70 mm/s (4,2 m/min)	7,42 mm/s (44,5 cm/min)

O registro dos sinais elétricos foi realizado utilizando o sistema de aquisição OSCILOS com tempo e freqüência de aquisição de 5 s e 5 kHz, respectivamente.

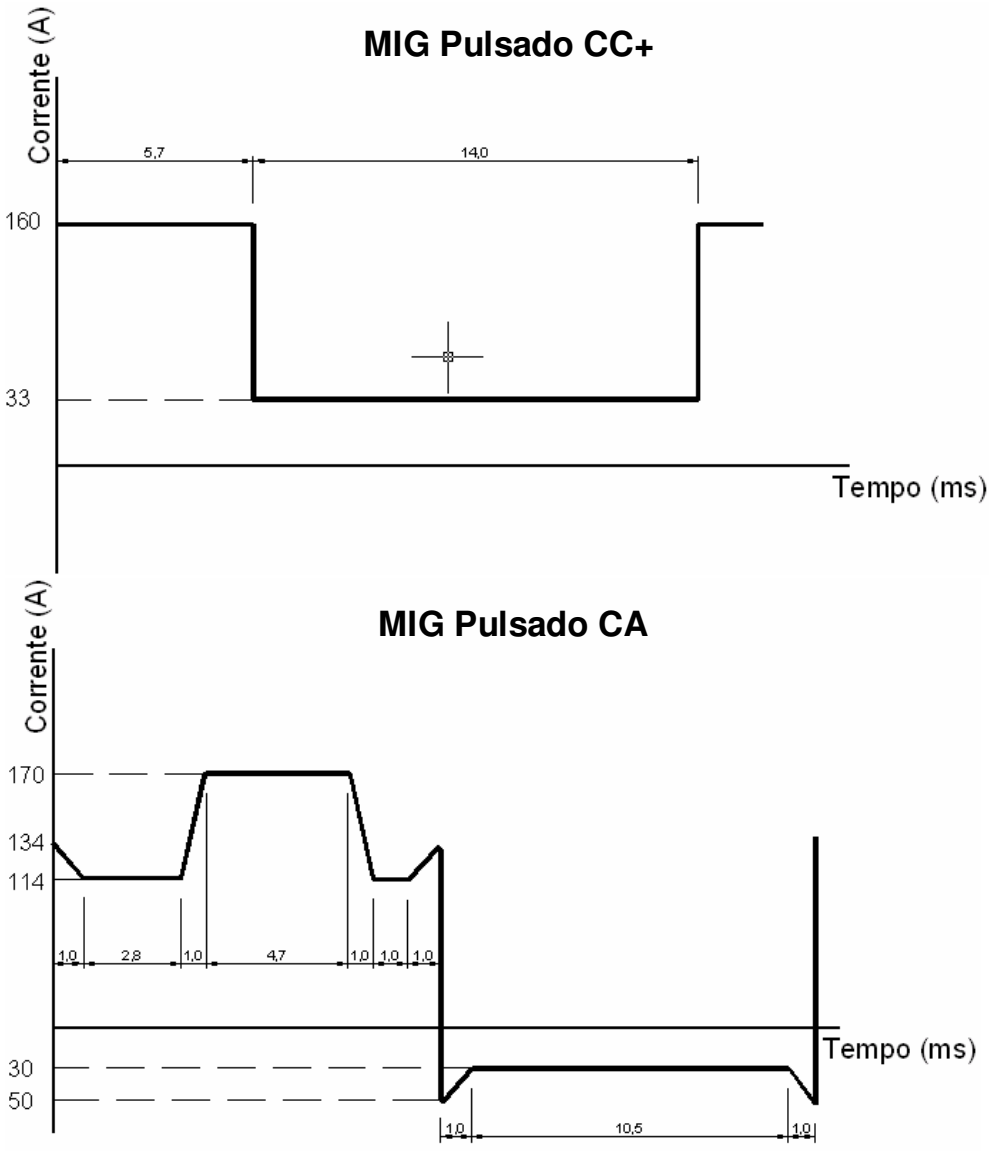


Figura 28 – Formatos de onda para as condições CC+ e CA.

CAPITULO 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo são descritos os resultados obtidos para cada grupo de experimentos, que seguiram os procedimentos experimentais definidos no capítulo anterior.

4.1 Influência do tempo de atuação da polaridade positiva na soldagem TIG CA do alumínio

4.1.1 Influência de %EP sobre a Limpeza Catódica

Com o intuito de determinar o valor mínimo de %EP necessário para que ocorra remoção de óxido de modo satisfatório, foram realizados cordões de solda sobre chapa, onde após cada teste, aumentava-se 0,5% no valor de %EP, o que corresponde a uma variação de 0,1 ms no tempo de polaridade positiva. Por intermédio de uma simples inspeção visual e para a velocidade de soldagem e para a corrente utilizada neste experimento (3,33 mm/s e 100 A em cada polaridade, respectivamente), chegou-se a um valor de 6,5% para %EP (correspondente a 1,3 ms). Alguns resultados são apresentados nas Figuras 29.a e 29.b onde é possível notar que a limpeza catódica não foi suficiente de modo que a fusão ocorre sob uma camada de óxido e o cordão de solda apresenta uma aparência rugosa. Na Figura 29.c é apresentado um cordão de solda de aparência lisa, com uma pequena área de limpeza circundante ao cordão (faixa de limpeza catódica), que foi considerado aceitável.

A Figura 30 demonstra a influência de %EP sobre a faixa de limpeza catódica. Pode-se notar que esta região aumenta à medida que se aumenta %EP. Isto fica bastante evidente quando se compara os extremos. Em %EP = 6,5% tem-se uma faixa bastante estreita, enquanto em %EP = 50% é possível notar uma faixa significativamente mais larga. O efeito de %EP sobre a limpeza catódica e a largura do cordão de solda decorre provavelmente do maior espalhamento do arco sobre a região de soldagem. Quanto maior o tempo de polaridade positiva, maior a formação de manchas catódicas em busca por novos pontos onde a emissão de elétrons seja facilitada pela presença de óxido.

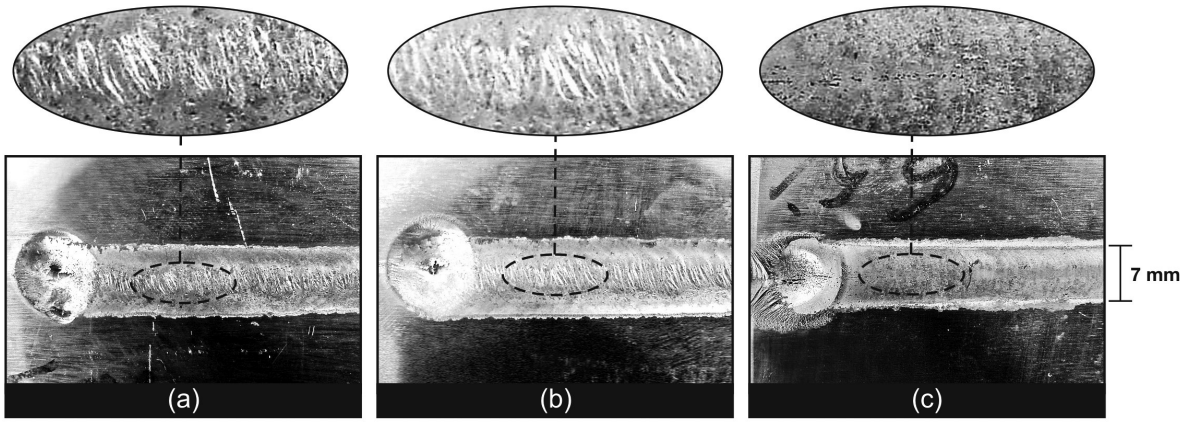


Figura 29- (a) Cordão de solda realizado com %EP = 5,0%; (b) Cordão de solda realizado com %EP = 6,0%; (c) Cordão de solda realizado com %EP = 6,5% e considerado de aparência aceitável. Cordões de solda realizados com velocidade de soldagem de 3,33 mm/s (20 cm/min), corrente de soldagem regulada em 100 A para ambas as polaridades e período de 20 ms

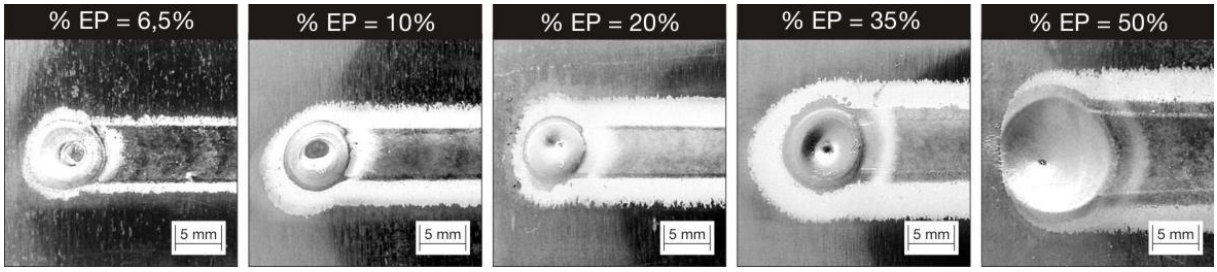


Figura 30 – Aparência de alguns dos cordões de solda realizados durante o ensaio com velocidade de soldagem de 3,33 mm/s (20 cm/min), corrente de soldagem regulada em 100 A para ambas as polaridades e período de 20 ms.

4.1.2 Influência de %EP sobre a Tensão e a Potência de Arco

Os gráficos apresentados na Figura 31 correspondem às variações de Tensão Eficaz (Uef) e Potência Média de arco (Pm) com o Percentual de Eletrodo Positivo (%EP). Três séries de ensaios estão indicadas nestes gráficos, onde cada série corresponde à seqüência apresentada pela Tabela 2 (Capítulo 3, item 3.2.1). Em função do mecanismo de emissão de elétrons por efeito de campo, que demanda maior tensão na região de queda catódica, esperava-se um aumento gradual dos valores de Tensão Eficaz e Potência Média, à medida que %EP aumentasse, fato que não aconteceu. Em outras palavras, supunha-se que com maiores tempos de polaridade positiva, maiores seriam os valores de Uef e Pm em função da crescente necessidade de se extrair elétrons a partir de um cátodo não-termiônico (no caso, o alumínio).

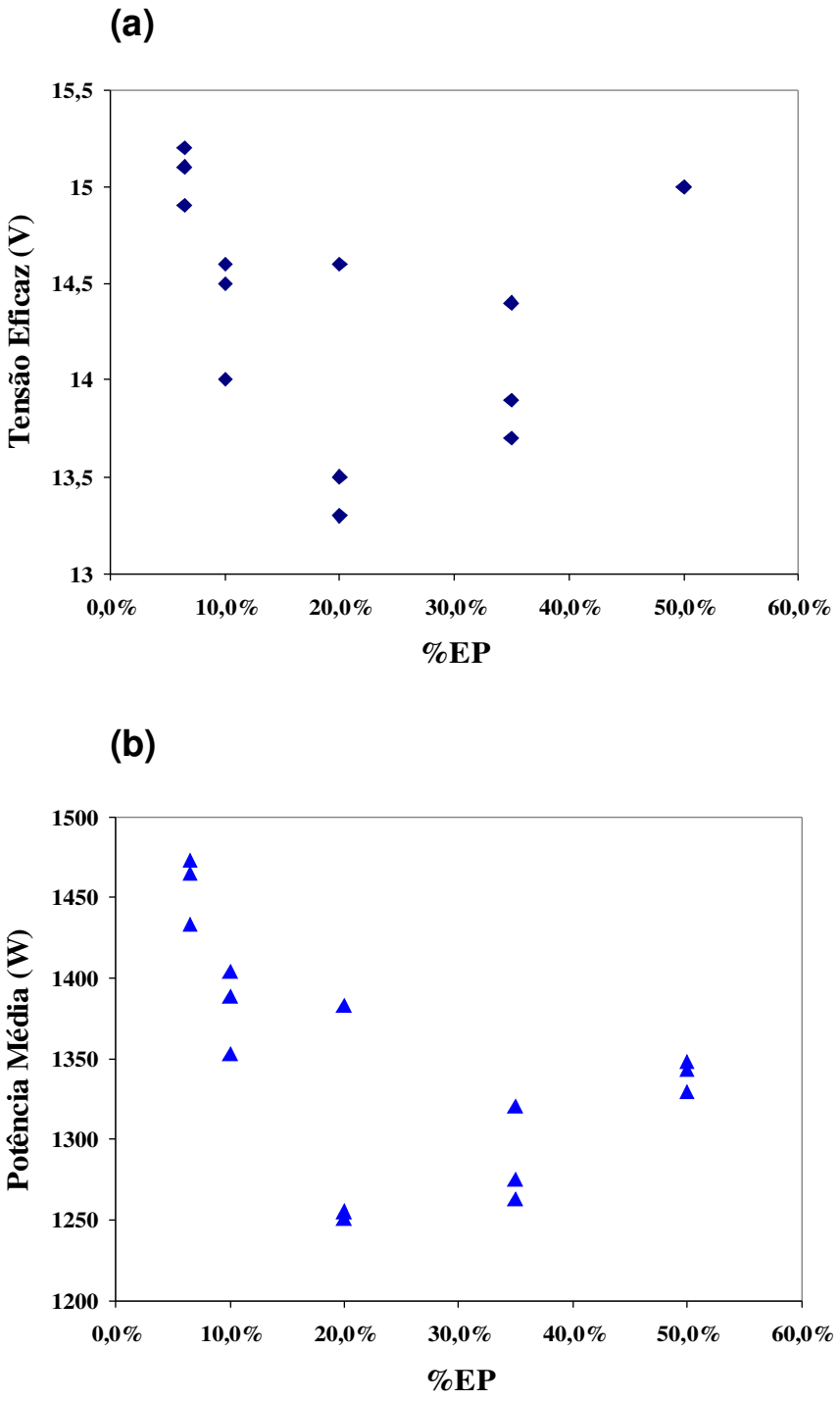


Figura 31 - (a) Gráfico da relação entre Tensão Eficaz e Percentual de Eletrodo Positivo (%EP). (b) Gráfico da relação entre Potência Média e Percentual de Eletrodo Positivo (%EP). Referentes a todas as séries de ensaios.

Estes resultados podem ser explicados a partir de uma análise dos oscilogramas de tensão, que são apresentados na Figura 32 que correspondem a uma das três séries de ensaios. Estes deixam evidente uma diminuição gradual nos valores médios absolutos de tensão durante a fase negativa do processo, com o aumento de %EP. Isto sugere uma situação mais propicia

para a emissão de elétrons por intermédio do efeito termiônico, que pode estar relacionada com o sobre aquecimento do eletrodo de tungstênio durante as sucessivas fases positivas (onde o cátodo é a peça de trabalho) ou até mesmo a uma melhora na condutividade elétrica do gás ionizado em regiões próximas a ponta do eletrodo de tungstênio (quando este é o cátodo) causado pelo aumento de temperatura [14, 48], permitindo que o fluxo de elétrons ocorra com uma tensão menor. Portanto, quanto mais tempo de polaridade positiva t(+) é empregado, maior é o calor gerado no eletrodo e menor a tensão necessária para a emissão e condução de elétrons durante a fase negativa.

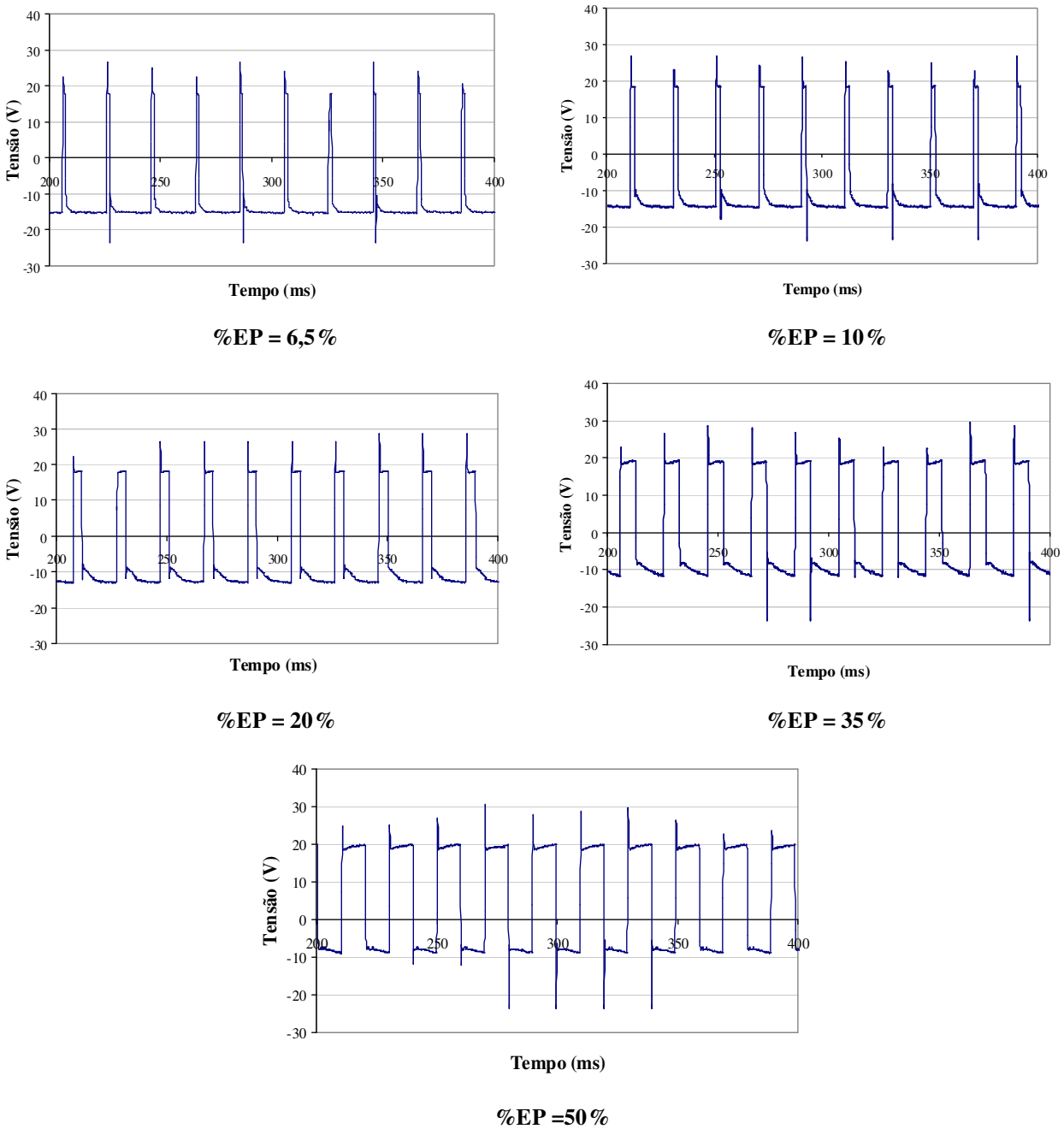


Figura 32 - Oscilogramas de tensão correspondentes a cada percentual de eletrodo positivo testado.

Um indício de que a temperatura do cátodo influi na tensão pode ser visto nos oscilogramas. Considerando isoladamente apenas a fase negativa, nota-se que logo após a transição de positivo para negativo, o módulo da tensão aumenta com o tempo. Ou seja, a temperatura do cátodo de tungstênio diminui e a emissão de elétrons demanda maior tensão. Este fenômeno é mais evidente onde %EP é maior como em 35% e 50%. A Figura 33 mostra apenas um ciclo de corrente e exemplifica o aumento de tensão para uma %EP de 35%.

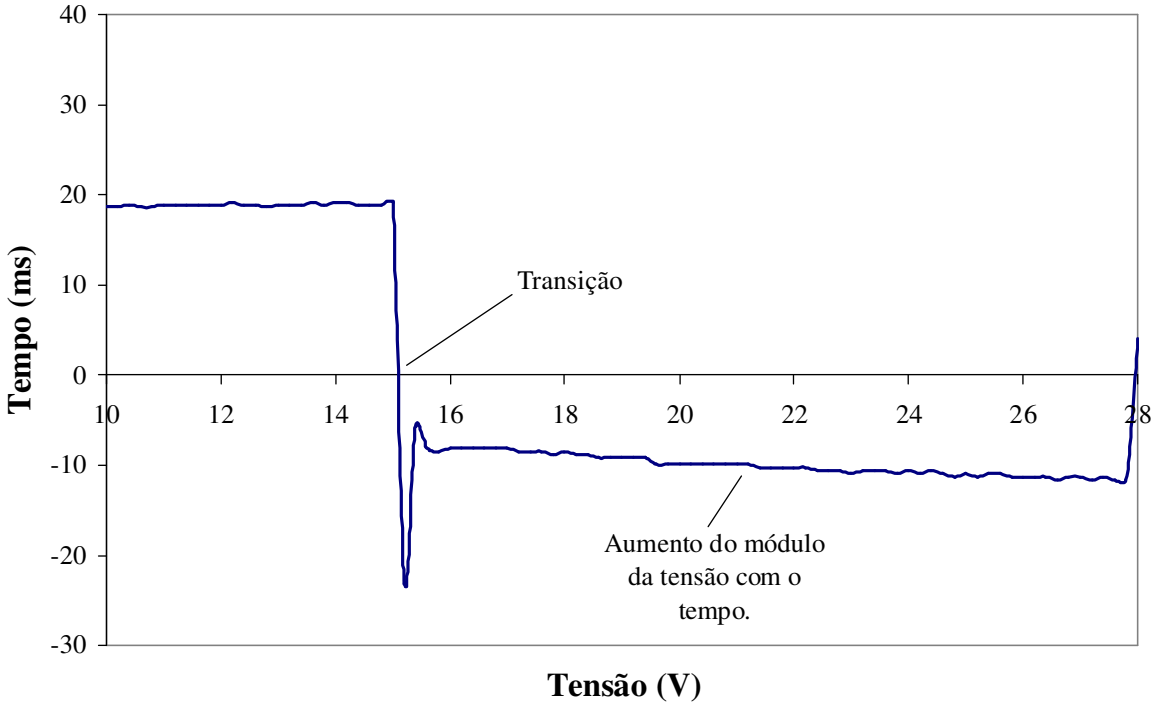


Figura 33 – Aumento do módulo da tensão com o tempo logo após a transição de negativo para positivo.

Conforme esperado, há realmente um aumento das tensões médias durante as fases positivas do processo, porém menor do que a diminuição das tensões médias na polaridade negativa. Desta forma, de 6,5% até 20% Uef cai, pois os valores de tensão durante as fases negativas caem de forma acentuada. A partir de 20% o comportamento se inverte, pois o tempo de polaridade t(+) torna-se mais significativo, compensando a queda nos valores de tensão apresentada nas fases negativas e, como resultado, Uef aumenta. A Tabela 7 apresenta a Tensão Média Negativa (valores absolutos) e a Tensão Média Positiva, que correspondem às tensões médias calculadas separadamente para cada polaridade. Estes dados corroboram o discutido no parágrafo anterior, mostrando em valores absolutos, a diminuição da Tensão Média Negativa e o aumento da Tensão Média Positiva à medida que %EP aumenta.

Tabela 7 - Tensões Médias calculadas separadamente para as polaridades negativa e positiva.

	Tensão Média Negativa (V)			Tensão Média Positiva (V)		
Ensaio / %EP	1	2	3	1	2	3
6,5%	14,9	14,6	14,8	17,5	17,4	17,3
10%	14,0	13,9	13,5	18,1	17,5	17,2
20%	11,7	11,6	13,1	18,0	17,8	18,7
35%	10,1	10,45	10,2	18,6	19,3	18,1
50%	8,2	7,9	8,0	19,2	19,3	19,4

Como a intensidade de corrente foi mantida constante tanto para as fases de corrente positivas, quanto negativas, o comportamento da Potência Média depende apenas das variações de tensão ocorridas. Logo o comportamento da Potência Média (Pm) é semelhante ao da Tensão Eficaz (Uef). Isto é mais fácil de ser identificado por intermédio do cálculo separado das potências em cada uma das polaridades. A Figura 34 apresenta isto para as três séries de ensaios, onde a Potência (+) representa a potência média somente das fases de polaridade positiva e Potência (-) representa a potência média somente das fases de polaridade negativa. O gráfico torna nítido que Potência (-) decresce muito mais acentuadamente com o aumento de %EP do que a Potência (+) cresce. Conseqüentemente, a Potência Média (Pm) diminui entre 6,5% e 20%, quando passa a aumentar, pois o tempo de permanência do processo em polaridade positiva t(+) aumenta.

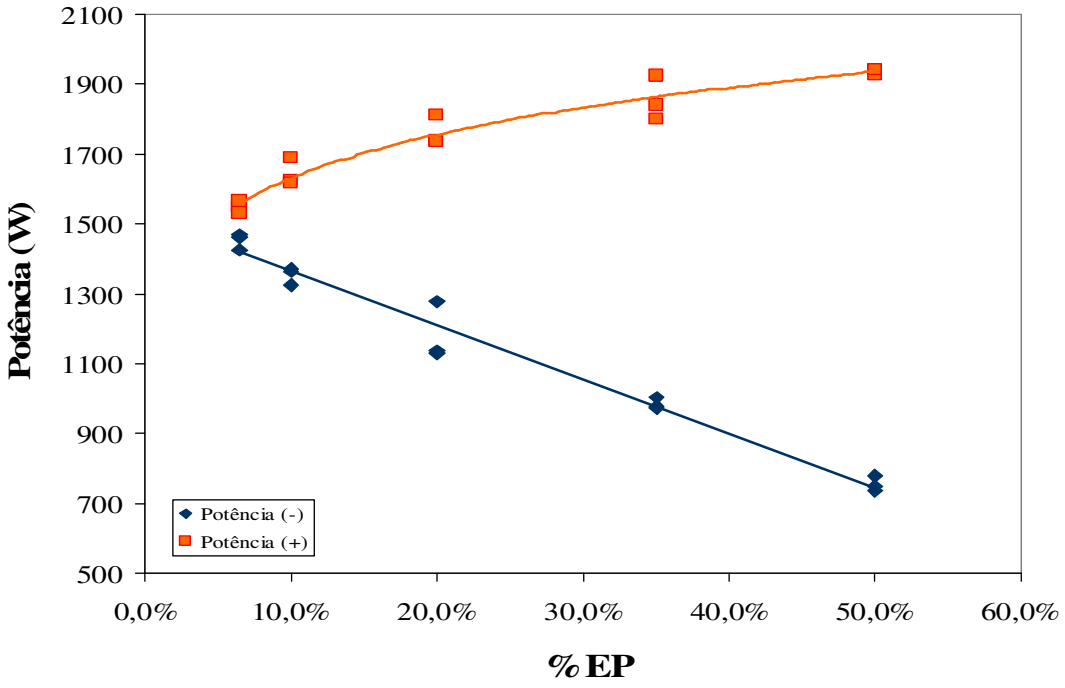


Figura 34 – Comportamento da Potência Média calculadas separadamente para cada polaridade.

4.1.3 Influência de %EP sobre a Zona Fundida

Diferente do entendimento tradicional do processo TIG, apresentado na literatura corrente [3, 6, 12, 13, 15], os resultados obtidos neste item apontam situações onde houve uma melhoria nas características de fusão do metal de base com o aumento do tempo de atuação da polaridade positiva t(+).

A Figura 35 apresenta as macrografias das secções transversais de todos os cordões de soldas realizados neste grupo de experimentos, indicando o percentual %EP e a Potência Média (Pm) medida. Comparando uma macrografia correspondente ao percentual %EP de 6,5% com uma macrografia correspondente ao percentual %EP de 35%, têm-se características de fusão bastante semelhantes, mesmo com Potências Médias diferentes. Isto é um indicativo de que não se pode relacionar a potência com as dimensões do cordão de solda.

A Figura 36 mostra os gráficos da Profundidade de penetração (mm) e da Área da Zona Fundida (mm²) em função da do aumento de %EP, para todos os ensaios. Uma comparação pode ser feita, desta vez entre os dois extremos e, em %EP = 50% tem-se maior fusão do metal de base que em %EP = 6,5%.

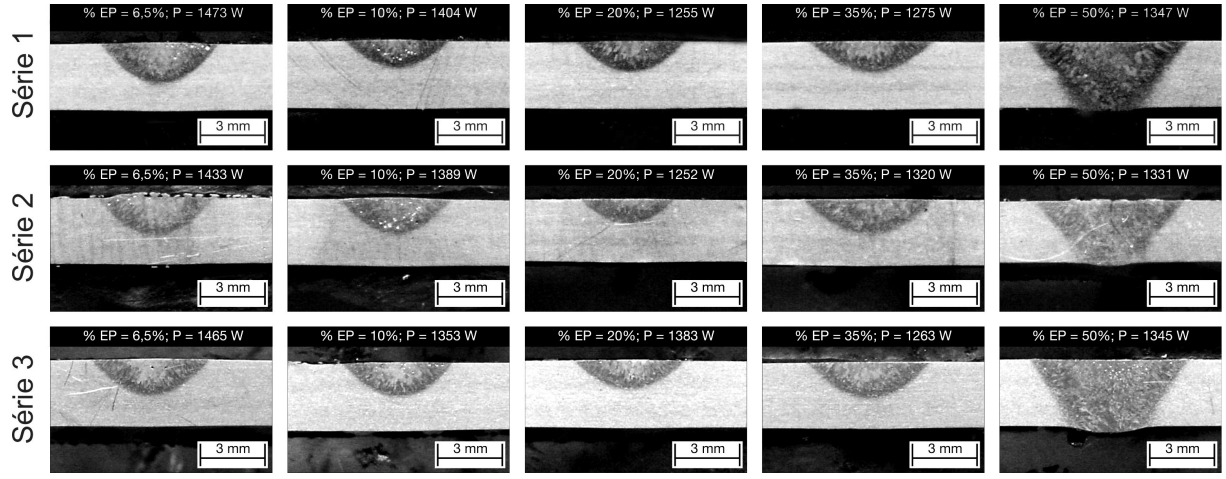


Figura 35 – Macrografias das secções transversais correspondentes todas as séries de ensaios realizados com variação de %EP. Velocidade de soldagem de 3,33 mm/s (20 cm/min), corrente de soldagem regulada em 100 A para ambas as polaridades e período de 20 ms.

Os resultados apresentados neste item estão, de modo geral, em concordância com os trabalhos de Fuerschbach [1] e Yarmuch e Patchett [17]. Uma teoria proposta por estes autores é de que a maior fusão do metal de base encontradas em grandes tempos de polaridade positiva está relacionada diretamente a emissão de elétrons por efeito de campo que gera maior energia no cátodo.

A Equação (3) (replicada neste item) ajuda a elucidar esta questão. Esta mostra um termo negativo na segunda parcela, ($J_e \phi$), que está relacionada a perdas de calor no eletrodo de tungstênio para cada elétron emitido via efeito termiônico. Quando o eletrodo de tungstênio torna-se o ânodo durante os ciclos de corrente positiva, estas perdas de calor não mais ocorrem, e o eletrodo de tungstênio sofre grande desgaste. Estas perdas de calor aconteceriam exclusivamente se o cátodo estiver emitindo elétrons por intermédio do efeito termiônico. Quando a peça de trabalho torna-se o cátodo durante as fases de corrente positiva, esta emitirá elétrons por efeito de campo e não ocorrerão perdas de calor devido à emissão de elétrons. Isto, associado a um aumento na queda de tensão catódica (característico da emissão de elétrons por efeito de campo) aumenta a capacidade do processo de fundir o metal de base, quando os tempos de polaridade positiva são elevados.

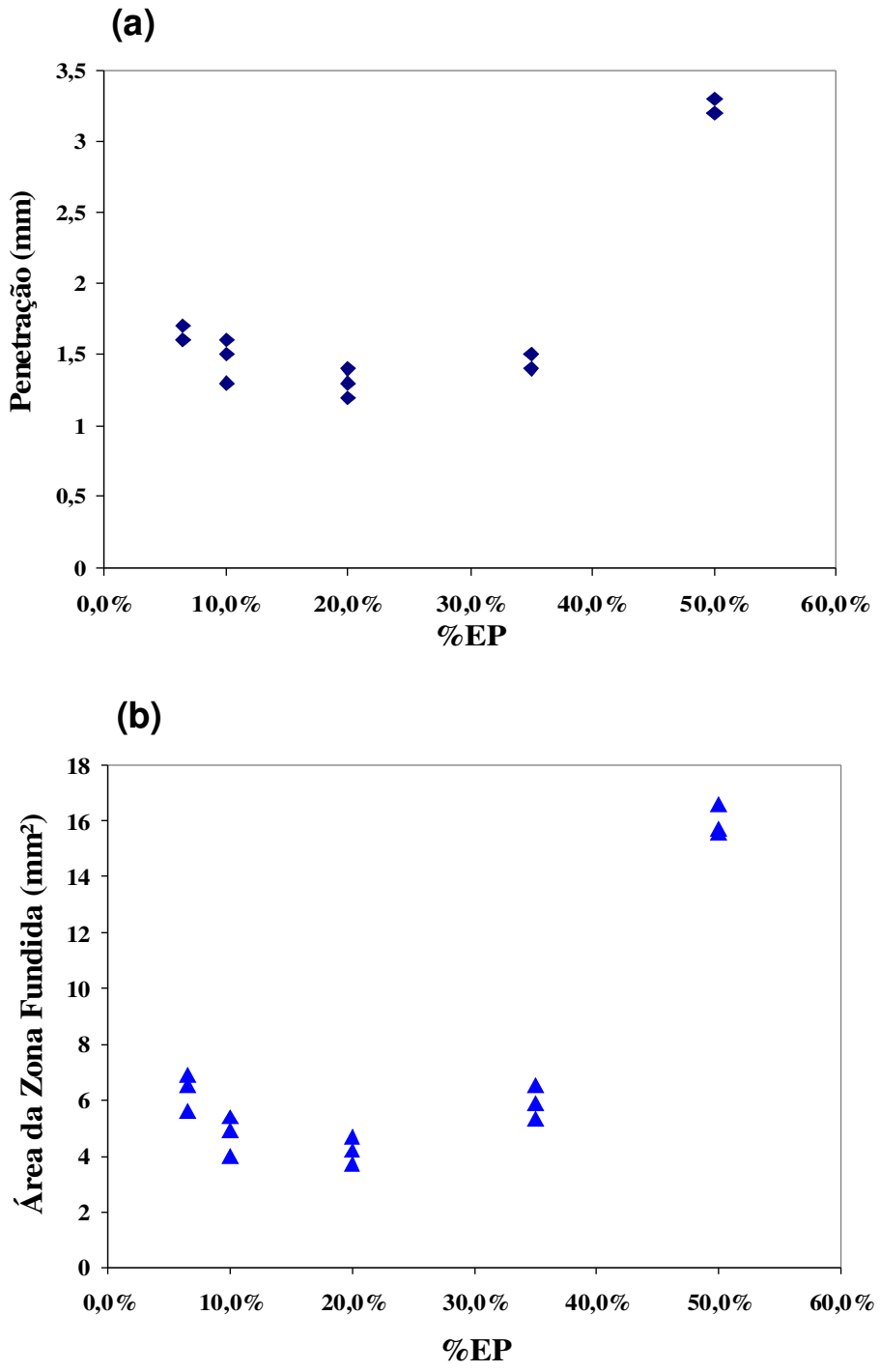


Figura 36 - (a) Relação entre %EP e Profundidade de penetração de solda (mm). (b) Relação entre %EP e Área da zona fundida (mm²).

$$Hc = j_i(Vc + Vi - \phi) - j_e\phi \quad (3)$$

Onde:

Hc = Calor gerado no cátodo.

ji = Densidade de corrente carregada pelos íons.

je = Densidade de corrente carregada pelos elétrons.

Vc = Queda de tensão catódica.

Vi = Potencial de ionização do plasma.

ϕ = Função-trabalho do material.

Entre os valores de %EP = 6,5% e 20%, o tempo de atuação da polaridade positiva é pequeno, tendo pouca influência sobre as características geométricas do cordão de solda. Com o aumento de %EP, provavelmente a fase positiva começa a ter maior influência sobre a solda, pois aumenta o tempo na qual o processo permanece nesta.

A situação onde %EP = 6,5% mostrou-se bastante indicada quando se quer boa penetração aliada a uma estreita de limpeza catódica e desgaste mínimo do eletrodo de tungstênio.

4.2 Influência da intensidade da corrente positiva na soldagem TIG CA do alumínio

4.2.1 Influência de I(+) sobre a Limpeza Catódica

Os cordões de solda apresentados na Figura 37, correspondem a um dos conjuntos de ensaios realizados. Apesar da largura dos cordões aumentar gradativamente com o aumento da corrente positiva aplicada, esta não produziu uma mudança significativa sobre a faixa de limpeza catódica, ao contrário dos resultados expostos no item 4.1.1, onde menores tempos de atuação da polaridade positiva produziram faixas de limpeza mais estreitas. Um comportamento distinto foi observado por Barhorst [56], que verificou maior influência da intensidade da corrente positiva sobre a limpeza catódica. Esta diferença pode ter ocorrido devido a diferenças entre os procedimentos experimentais deste autor e os utilizados neste grupo de experimentos.

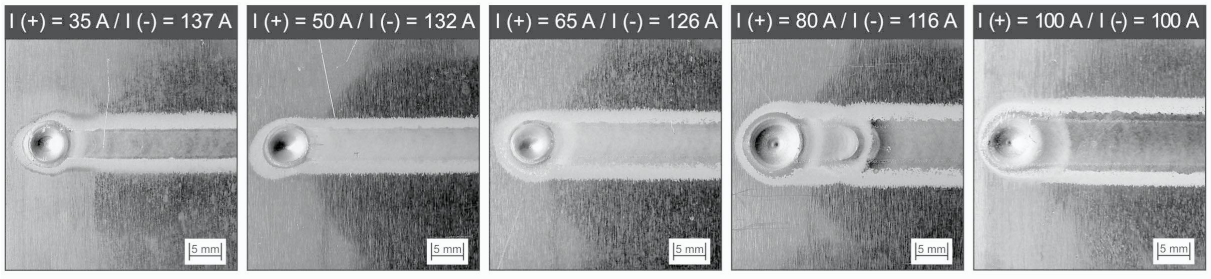


Figura 37 - Aparência dos cordões de solda realizados durante os ensaios. Velocidade de soldagem de 3,33 mm/s (20 cm/min) e tempos de duração da polaridade negativa e positiva mantidos constantes em 10 ms cada um.

4.2.2 Influência de I(+) sobre a Tensão e a Potência de Arco

A Figura 38 apresenta a variação da Tensão Eficaz (Uef) e da Potência Média (Pm) em função da intensidade da corrente positiva. O gráfico da Figura 38.a mostra um decréscimo nos valores de Tensão Eficaz bastante significativo entre as corrente positivas de 35 e 80 A. Não se constata qualquer tendência de forma suficientemente clara na curva Corrente Positiva x Potência Média da Figura 38.b.

Para explicar os comportamentos da Tensão Eficaz e da Potência Média, os oscilogramas de corrente e tensão foram analisados. Alguns destes são mostrados na Figura 39 e constatam uma diminuição nos valores médios de tensão durante as fases de corrente negativa e um aumento durante as fases positivas. O aumento dos valores médios de tensão durante as fases positivas é menor do que a diminuição que ocorre durante as fases negativas, ou seja, não há equivalência entre as variações de tensão que ocorrem nas duas polaridades e como conseqüência, a Tensão Eficaz diminui com o aumento da Corrente Positiva I(+).

A diminuição dos valores médios de tensão durante as fases negativas pode ter sido provocada pelo maior aquecimento do eletrodo de tungstênio durante as fases positivas e assim, favorecendo a emissão de elétrons via efeito termiônico, quando a polaridade se inverte. Outro fator que pode contribuir nisto é a possibilidade de ocorrer um maior aquecimento do plasma, provocando uma melhoria na sua condutividade elétrica e permitindo que elétrons sejam conduzidos através deste com uma tensão menor [48]. De maneira similar ao item 4.1.2, ao analisar isoladamente as fases negativas, logo após a transição de positivo para negativo, tem-se um aumento do módulo da tensão. Isto ocorre devido à diminuição de temperatura sofrida pelo eletrodo de tungstênio assim que ele se torna o cátodo.

Além disso, deve-se lembrar que a intensidade da corrente negativa era sempre diminuída para manter um valor de corrente eficaz *(Ief)* de 100 A, conforme a metodologia adotada. Isso também pode ter sua influência sobre este resultado. Ou seja, pode-se dizer que os efeitos citados acima, somados, contribuíram para a ocorrência de menores valores de tensão durante a polaridade negativa.

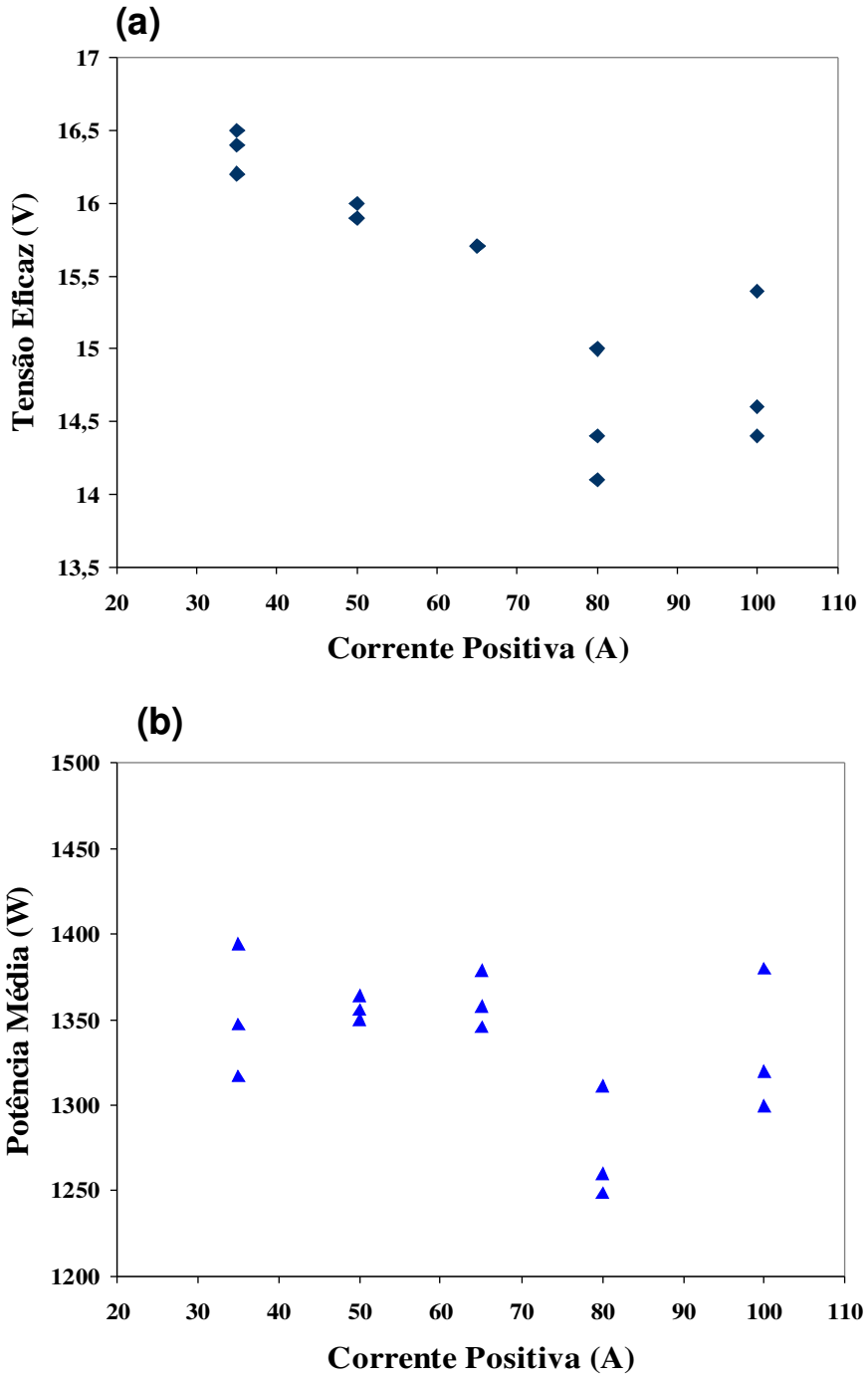
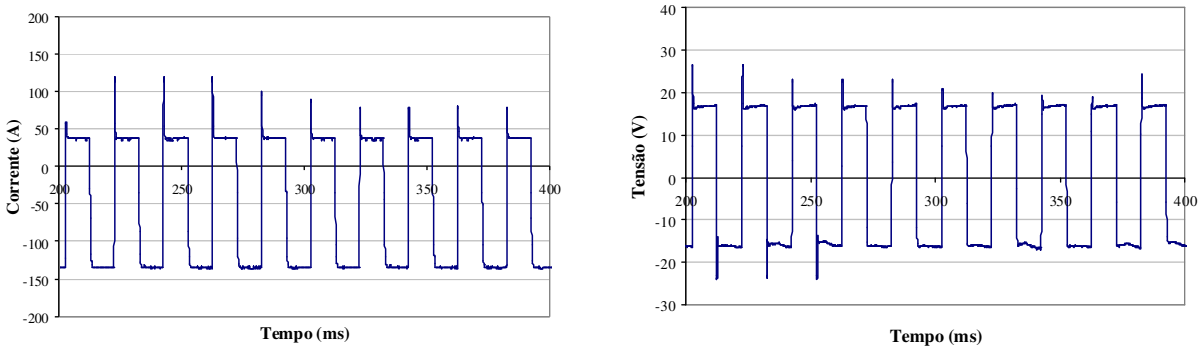
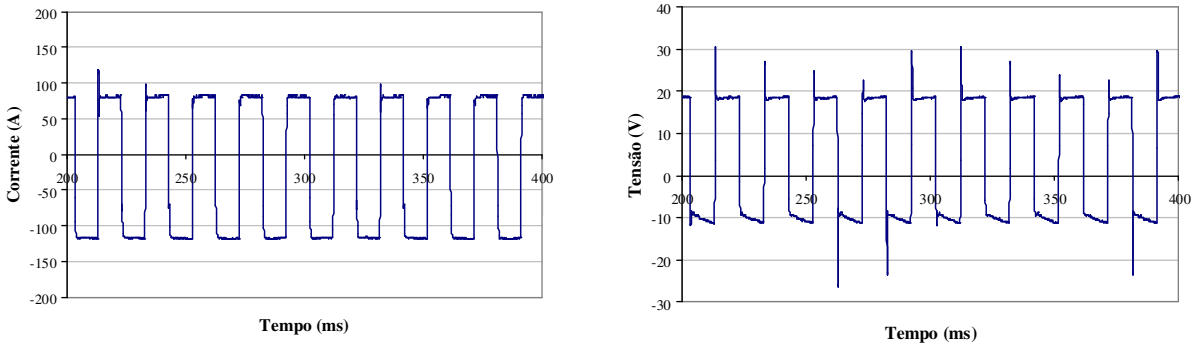


Figura 38 – (a) Relação entre Tensão Eficaz e Corrente Positiva. (b) Relação entre Potência Média e Corrente Positiva.

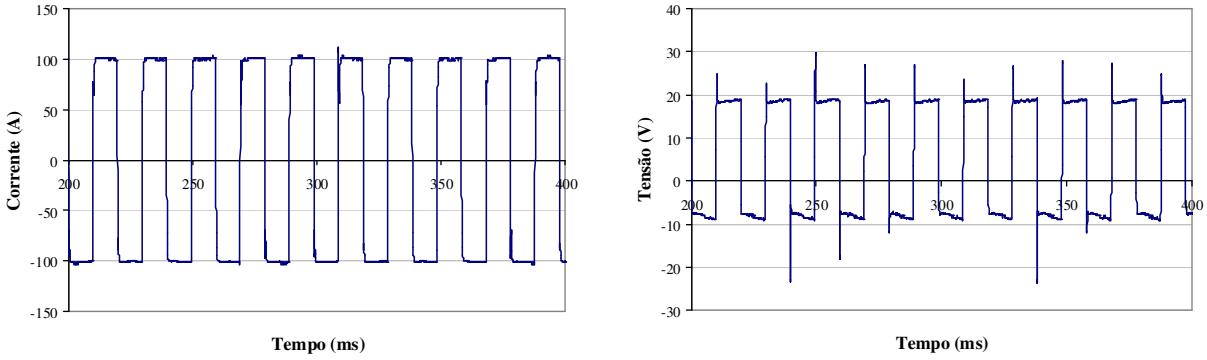
A variação dos valores médios de tensão durante as fases positivas foi, conforme já comentado, menor em relação à que ocorre durante os ciclos negativos. A Tabela 8 mostra a Tensão Média calculada separadamente para cada polaridade, sendo que Tensão Média Negativa indica os valores absolutos de tensão.



I(+) = 35 A; I(-) = 137 A



I(+) = 80 A; I(-) = 116 A



I(+) = 100 A; I(-) = 100 A

Figura 39 – Oscilogramas de tensão correspondentes a cada par I(+) / I(-) testado.

Tabela 8 - Tensões Médias calculadas separadamente para as polaridades negativa e positiva.

Ensaio / I(+)/I(-)	Tensão Média Negativa (V)			Tensão Média Positiva (V)		
	1	2	3	1	2	3
35 A/ 137 A	15,6	16,0	15,9	16,5	16,7	16,7
50 A/ 132A	14,3	14,4	14,2	16,9	17,1	17,2
65 A/ 126 A	13,2	12,7	12,3	17,6	18,0	18,2
80 A/ 116 A	10,2	9,9	10,2	18,3	17,5	16,9
100 A/ 100 A	8,3	8,2	8,4	18,5	18,3	19,7

A Potência Média foi calculada separadamente para as fases positivas, Potência (+), e para as fases negativas, Potência (-). O gráfico da Figura 40 foi construído com os valores calculados para as três séries de ensaios realizadas. No item anterior, o tempo de atuação da polaridade positiva era modificado. Isto fez com que somente as variações de tensão tivessem atuação sobre a potência do arco. Neste estudo, corrente e tensão sofrem variações. Sendo assim, a característica decrescente apresentada pela curva das potências médias negativas pode ser associada tanto ao decréscimo dos valores de corrente quanto à diminuição dos valores médios de tensão durante as fases negativas, mostrados anteriormente na Figura 36.a. Conforme já comentado, durante as fases positivas os valores médios de tensão sofreram menor variação com a intensidade da corrente positiva, comparada com a variação nas fases negativas. Portanto, a acentuada característica crescente, apresentada pela curva das potências médias positivas é devida sobretudo ao aumento dos valores de corrente positiva durante os ensaios. A Figura 40 ajuda a explicar o comportamento da Potência Média (Pm), mostrado na Figura 38.b, onde, com exceção da corrente positiva de 80 A, todos os valores medidos mantiveram-se na mesma faixa, sem manifestar uma tendência clara, crescente ou decrescente.

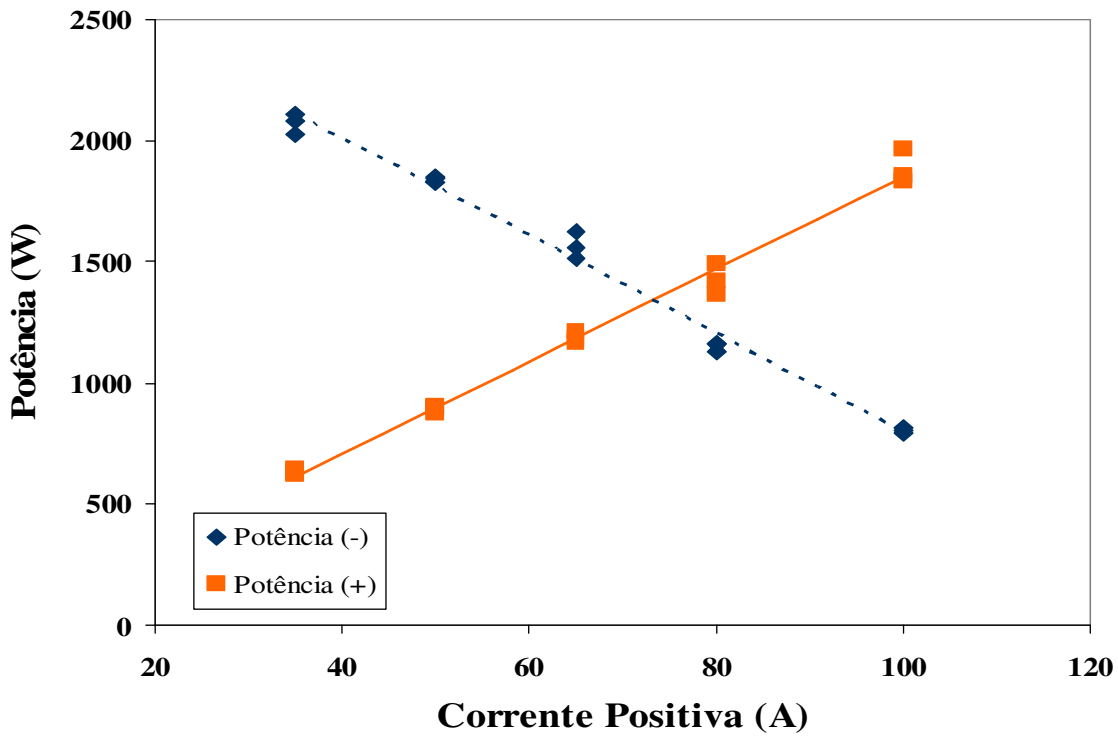


Figura 40 – Comportamento da Potência Média durante as fases positivas e negativas.

4.2.3 Influência de I(+) sobre a Zona Fundida

As macrografias apresentadas na Figura 41 evidenciam que as intensidades de corrente durante as fases positivas têm influência sobre o perfil de solda de maneira distinta ao entendimento tradicional concernente ao processo TIG CA. Há um incremento de Penetração de solda (mm) e Área da Zona Fundida (mm²) que são apresentados nos gráficos das Figuras 42.a e 42.b, respectivamente.

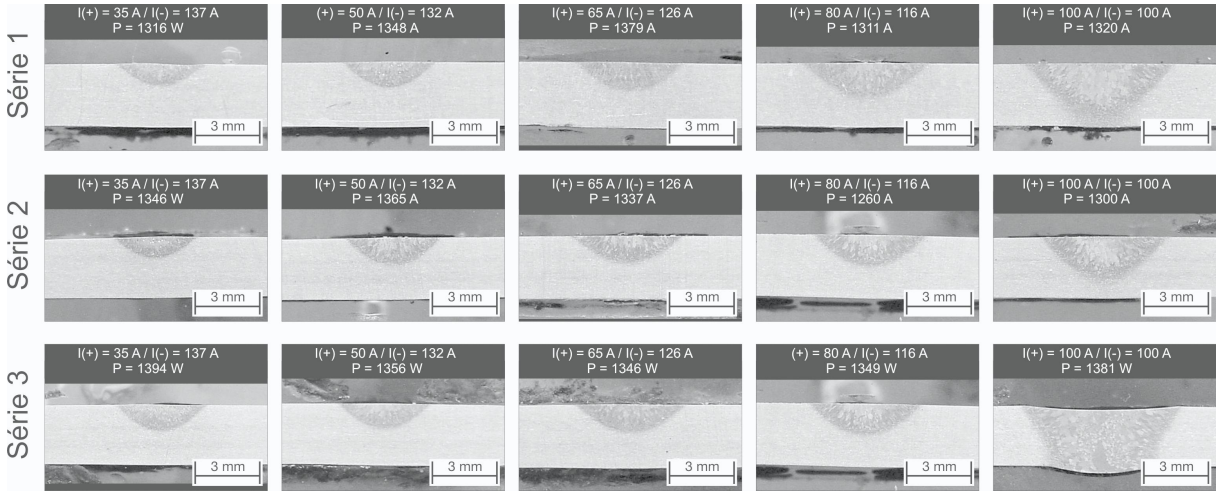


Figura 41 – Macrografias correspondentes a todas as séries de ensaios. Velocidade de soldagem de 3,33 mm/s (20 cm/min) e tempos de duração da polaridade negativa e positiva mantidos constantes em 10 ms cada um.

O efeito mais eficaz da polaridade positiva sobre a fusão da peça pode ser explicado à luz dos dois distintos mecanismos de emissão (termiônico e por campo). Segundo Fuerschbach [1] e Yarmuch e Patchett [17] na fase positiva do ciclo de corrente ocorre um aumento na queda de tensão catódica, necessária para a emissão de elétrons a partir de um cátodo não-termiônico (característica do efeito de campo). Isto gera uma energia extra sobre o metal de base que contribui para uma maior fusão do metal de base. A Equação (3) estima o calor gerado no cátodo em função da emissão de elétrons por intermédio do mecanismo termiônico sendo que o termo negativo na segunda parcela desta equação é o produto da densidade de corrente carregada pelos elétrons pela função-trabalho do cátodo ($J_e \phi$), caracterizando as perdas de calor causadas por cada elétron emitido a partir do eletrodo de tungstênio. Contudo, conforme já mencionado anteriormente, estas perdas são aplicáveis somente quando há emissão de elétrons por intermédio de efeito termiônico. Logo, estas perdas não ocorrem se o

cátodo estiver emitindo elétrons via efeito de campo, como no caso do alumínio durante as fases de corrente positivas, causando maior fusão.

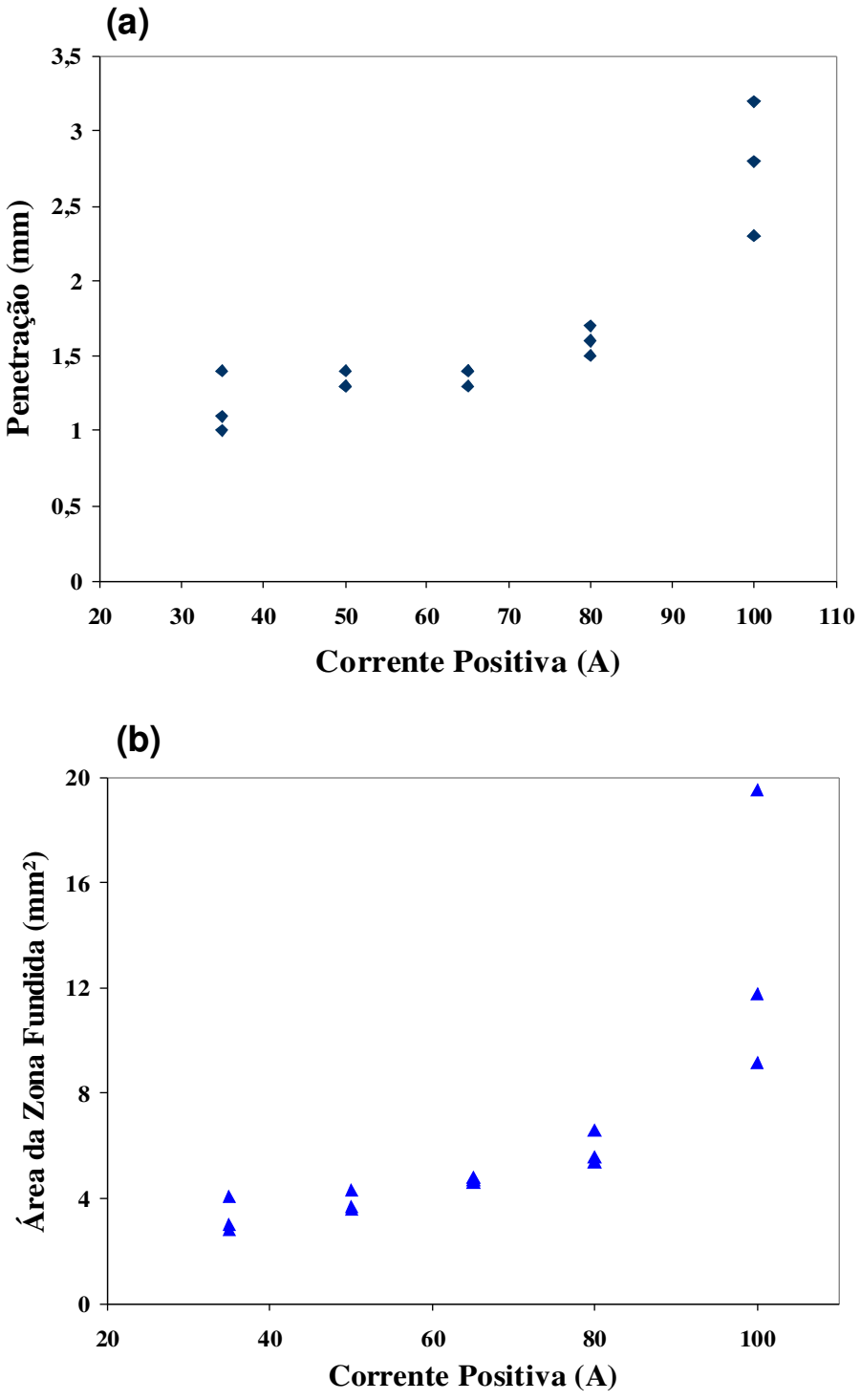


Figura 42 – (a) Relação entre Corrente Positiva e penetração de solda (mm). (b) Relação entre Corrente Positiva e Área da zona fundida (mm²).

4.2.4 Comparação entre o efeito da intensidade da corrente positiva e o tempo de atuação da polaridade positiva sobre a zona fundida na soldagem TIG CA do alumínio

A proposta deste item é fazer uma comparação direta entre o efeito da intensidade da corrente positiva e do tempo de atuação da polaridade positiva sobre a zona fundida. No estudo do item 4.1, o tempo de atuação da polaridade positiva era variado conforme uma determinada estratégia, de modo que a intensidade da corrente foi regulada em 100 A, tanto para a fase positiva quanto para a negativa, resultando assim em uma corrente eficaz de mesmo valor. A relação entre o tempo de permanência do processo em polaridade positiva (t(+)) e o período total do ciclo de corrente foi expresso por intermédio da Equação (10). No estudo do item 4.2, a intensidade da corrente em ambas as polaridade era variada, sendo que a corrente positiva foi arbitrada e a corrente negativa foi calculada por intermédio da Equação (12), de modo a resultar em uma corrente eficaz de 100 A. Neste caso, o tempo de duração de cada polaridade foi o mesmo para todos os ensaios.

Para tornar possível a comparação entre os resultados dos grupos de experimentos 1 e 2, foi estabelecida uma nova expressão para %EP, que foi chamada de Percentagem de Eletrodo Positivo equivalente ($\%EP_{eqv}$) denotada pela Equação (15). Derivada de uma regra de três composta, esta equação relaciona tanto os tempos de polaridade (positiva e negativa) quanto as intensidades de corrente (positiva e negativa).

$$\%EP_{eqv} = \frac{t(+)}{t(+)+t(-)} x \frac{I(+)}{I(-)} x100 \tag{15}$$

A Tabela 9 mostra a conversão dos valores de I(+) e I(-) para $\%EP_{eqv}$ e uma estratégia foi adotada para tornar a comparação mais compreensível. Como nem sempre os valores de %EP neste grupo de experimentos são numericamente equivalentes aos utilizados no grupo de experimentos 1 (6,5%; 10%; 20%; 35%; 50%), a comparação foi realizada por intermédio de um gráfico, apresentado na Figura 43, que relaciona %EP com os resultados de medições obtidos para a área da zona fundida de ambos os estudos. Este mostra boa equivalência entre ambos, sendo que os resultados experimentais puderam ser aproximados por funções de segunda ordem e há boa aproximação entre as duas curvas. Ocorrem intersecções entre as duas curvas (em %EP = 19% e EP = 35%, aproximadamente), o que também leva a crer que o

critério de comparação adotado é satisfatório. Contudo, a aproximação para uma função de segunda ordem foi menos precisa para os experimentos realizados com variação de corrente (R^2 = 0,7691) do que para os experimentos onde houve apenas atuação no tempo de polaridade positiva (R^2 = 0,9773). O valor R^2 calculado para cada curva é o Coeficiente de Determinação, que determina a adequação de um modelo de regressão aos valores medidos. Quando mais próximo de 1,0 é o valor de R^2, melhor a correspondência entre o modelo adotado e os dados experimentais [57]. A menor correlação entre o modelo e os dados experimentais, encontrada nos experimentos variando corrente, ocorre devido à grande dispersão nos resultados encontrados em %EP = 50%, onde I(+) = I(-) = 100 A. Do contrário, as duas curvas teriam maior semelhança.

Tabela 9 - Conversão dos valores de corrente (positiva e negativa) para $\%EP_{eqv}$.

I(+) (A)	I(-) (A)	$\%EP_{eqv}$
35	137	12,8%
50	132	19%
65	126	25,8%
80	116	34,5%
100	100	50%

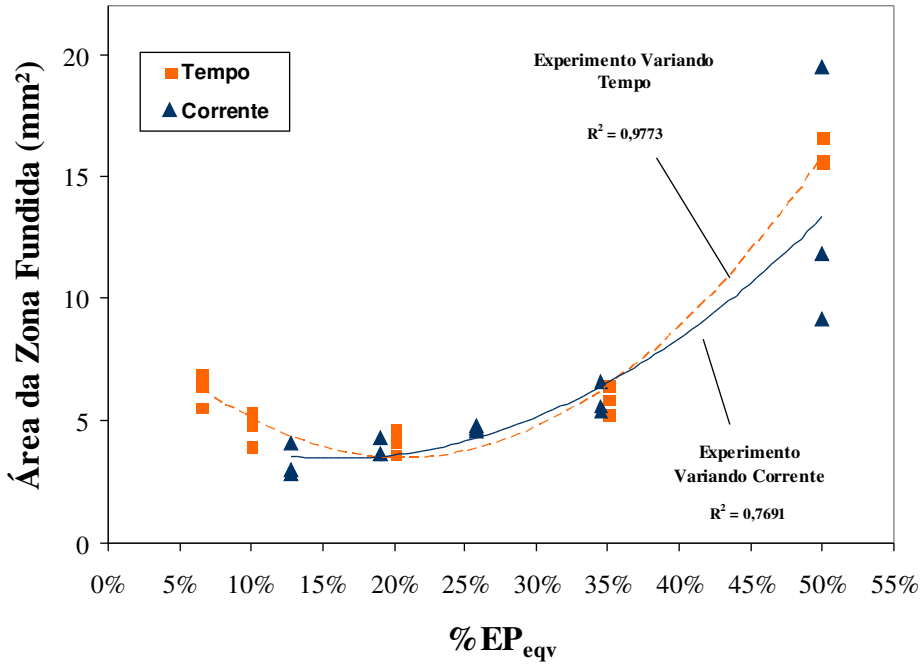


Figura 43 - Relação entre $\%EP_{eqv}$ e Área da Zona Fundida: comparação direta entre os dois experimentos (variando tempo e corrente).

Estes resultados sugerem que não há diferença significativa entre variar corrente e tempo de polaridade positiva, quando mantida uma corrente eficaz constante. Entretanto, no contexto do grupo de experimentos 1, foi encontrado um ponto ótimo (%EP = 6,5%), onde a eficiência de fusão é satisfatória, a faixa de limpeza catódica é estreita e o desgaste do eletrodo de tungstênio é mínimo. Durante estes ensaios, não se encontrou um ponto semelhante, pois a intensidade da corrente positiva teve pouca influência sobre a faixa de limpeza catódica. Além disso, valores de I(+) abaixo de 35 A produziram cordões de aspecto considerado não satisfatório e instabilidade de arco. Portanto, qualquer valor abaixo deste foi considerado inaceitável.

4.3 Influência da polaridade nas características dos cordões de solda e no comportamento do arco na soldagem MIG/MAG de aços ao carbono

4.3.1 Aspecto superficial dos cordões de solda

A Figura 44 mostra os cordões de solda (a), (b) e (c), correspondentes às condições de soldagem dadas na Tabela 5 (replicada aqui para facilitar a análise). Em (a) observa-se um cordão bastante liso e largo em comparação à (b) e (c), características típicas de uma soldagem MIG/MAG CC+ operando no modo de transferência goticular. O cordão (b) é um pouco menos largo que o anterior, mas de aparência superficial igualmente satisfatória, não havendo presença de respingos próximos a região de solda ou descontinuidades. Em (c), onde a relação Va/Vs foi respeitada, o cordão é menos largo que (b), em função do menor volume da poça de fusão e do menor calor aportado a peça. Também não há presença de respingos na região de solda ou descontinuidades que pudessem evidenciar maiores instabilidades no processo.

Ensaios preliminares mostraram que o uso de argônio puro como gás de proteção acarreta grande instabilidade de arco na condição CC-. Desta forma, a boa estabilidade do processo em CC- e a boa aparência superficial dos cordões de solda obtidos pode ser atribuída à presença de O_2 no gás de proteção (Ar + 2% O_2). Este gás, ao causar a oxidação da gota metálica e do eletrodo, possivelmente abrandou o efeito da polaridade negativa sobre a gota metálica.

Tabela 5 - Parâmetros de soldagem para os ensaios realizados em diferentes condições de polaridade e velocidade de soldagem.

Teste	Condição	Velocidade de alimentação de arame	Velocidade de soldagem	Tensão Eficaz	Corrente Eficaz
(a)	CC+	125,0 mm/s (7,5 m/min)	5 mm/s (30 cm/min)	31 V	259 A
(b)	CC-	191,7 mm/s (11,5 m/min)	5 mm/s (30 cm/min)	30 V	263 A
(c)	CC-	191,7 mm/s (11,5 m/min)	7,6 mm/s (46 cm/min)	30 V	259 A

A presença de O_2 na mistura também pode ter influenciado nos bons resultados por intermédio da capacidade deste gás de diminuir a tensão superficial [25] que retém a gota metálica ao arame. Desta forma, as gotas metálicas podem ter se destacado com maior facilidade e com volumes menores, as tornando menos suscetíveis a ação da força catódica de repulsão. Contudo, é importante ressaltar que a corrente utilizada nestes experimentos foi típica de transferência metálica goticular (ao menos para CC+, já que em comparação, na condição CC-, gotas metálicas de maiores volumes devem ter se formado) e é bastante provável que, em correntes mais baixas, o processo não opere tão bem na polaridade negativa, mesmo com este gás.

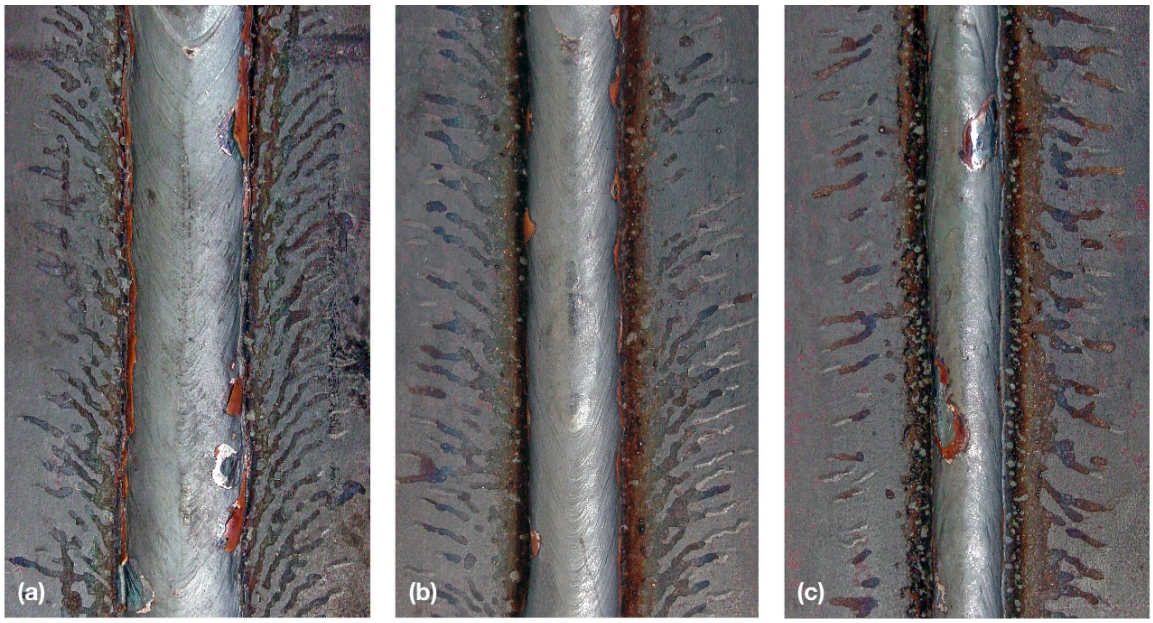
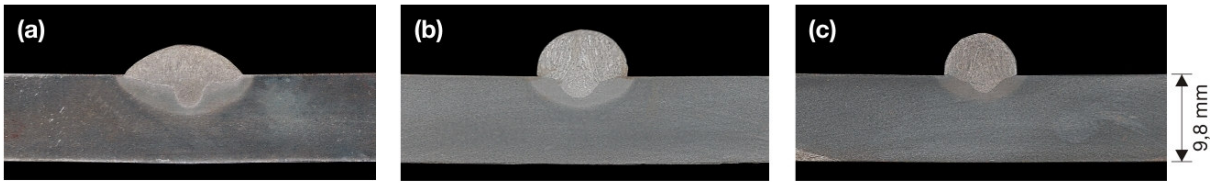


Figura 44 - Aparência superficial dos cordões de solda para as condições (a), (b) e (c).

4.3.2 Influência da polaridade sobre a geometria do cordão de solda

A Figura 45 apresenta as macrografias acompanhadas das principais condições de soldagem e dos resultados das medições realizadas em cada amostra. Comparando (a) e (b), que foram realizados com a mesma velocidade de soldagem, a mudança de polaridade em (b) resultou em uma diminuição significativa de penetração de solda e na área fundida e um aumento na área e na convexidade do reforço em relação a (a). Em (c), a profundidade de penetração é menor do que em (b), assim como a área de reforço. Este resultado foi atribuído unicamente à menor imposição de (maior velocidade de soldagem), haja vista que polaridade, corrente de soldagem e gás de proteção foram os mesmos.



Condições de soldagem: CC+; Vs = 5 mm/s.	**Condições de soldagem: CC-; Vs = 5 mm/s.**	**Condições de soldagem: CC-; Vs = 7,6 mm/s.**
Dimensões:	**Dimensões:**	**Dimensões:**
Área Fundida: 19,4 mm²	**Área Fundida: 10,0 mm²**	**Área Fundida: 7,0 mm²**
Área de Reforço: 30,6 mm²	**Área de Reforço: 42,0 mm²**	**Área de Reforço: 32,4 mm²**
Penetração de Solda: 3,8 mm	**Penetração de Solda: 2,5 mm**	**Penetração de Solda: 2,0 mm**

Figura 45 - Macrografias referentes aos ensaios (a), (b) e (c).

4.3.3 Influência da polaridade sobre o comportamento do arco

As fotografias do arco voltaico em ambas as polaridades são apresentadas na Figura 46. As fotografia correspondentes a condição CC+, mostra um arco com um núcleo central de alta energia e uma zona externa de menor energia, que segundo o que é relatado na literatura [15] é uma característica típica de arcos em atmosferas de argônio. Confirmando o que foi comentado previamente, o ponto de contato do arco com o arame-eletrodo se dá na extremidade do eletrodo.

Nas fotografias correspondentes a condição CC- é nítido que o ponto de contato se dá na extensão sólida do arame eletrodo. O núcleo de alta energia é menos evidente.

A Taxa de fusão foi 53% maior em CC- (191,7 mm/s contra 125 mm/s em CC+) nas condições de soldagem dadas na Tabela 5 e com gás de proteção Ar + 2% O_2. Evidentemente, esta proporção deve mudar conforme a corrente utilizada.

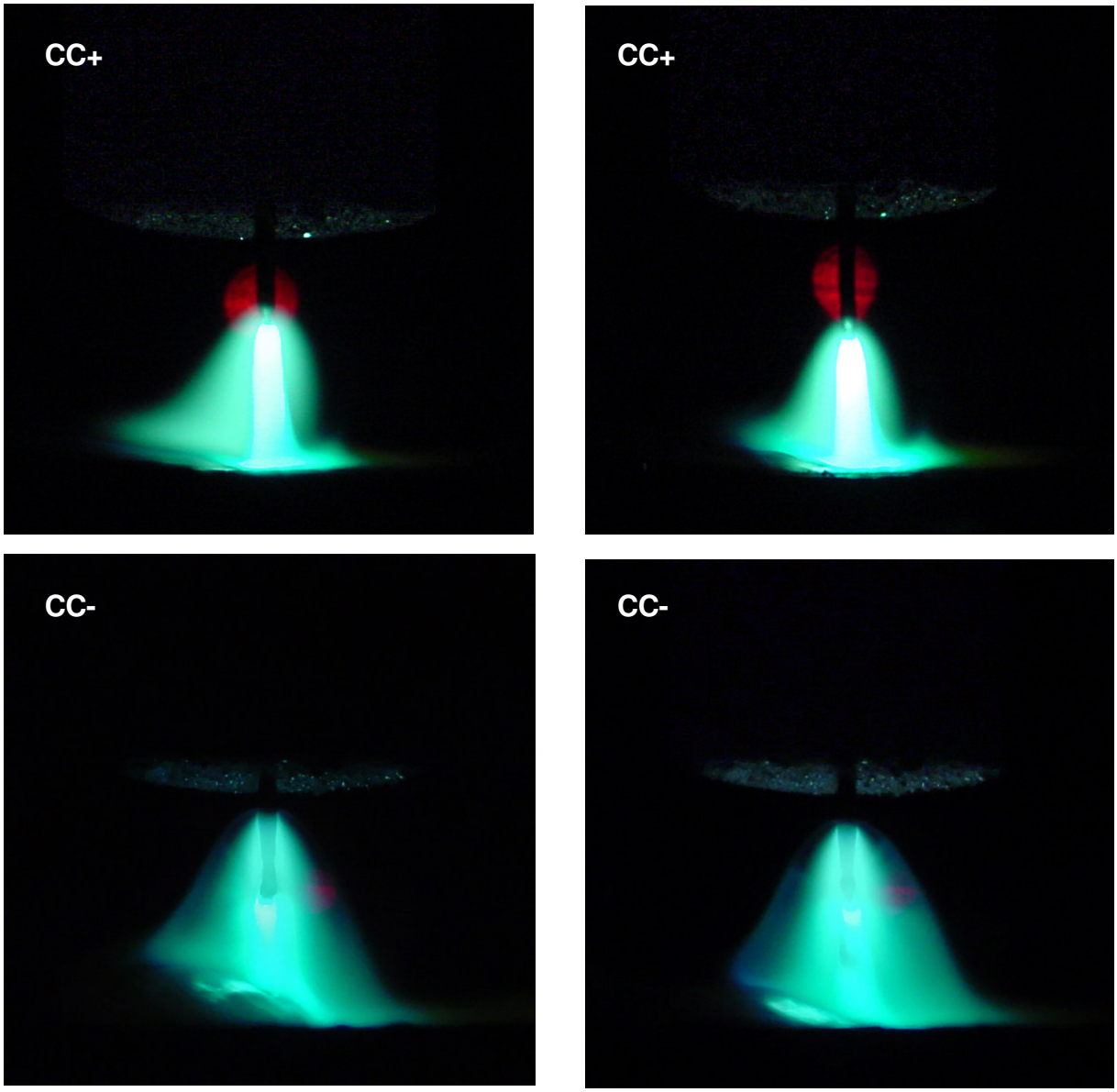


Figura 46 - Fotografias do arco voltaico em CC+ e em CC-. Realizadas nas mesmas condições de soldagem dos ensaios.

4.4 Avaliação do Desempenho das Modalidades MIG Pulsado CC+ e CA na Soldagem Automática de Juntas de Alumínio em Filete

4.4.1 Estabilidade: Observação e Análise

A Tabela 6 (que contém as condições de soldagem) e a Figura 28 (que mostra os formatos de onda de corrente para as condições pulsado CC+ e pulsado CA) foram replicadas neste item para facilitar a análise.

Tabela 6 - Condições de soldagem para o ensaio do Grupo 4.

Modalidade	Gás de Proteção	Velocidade de alimentação de arame	Velocidade de soldagem
MIG Pulsado CC+	Ar Puro	55 mm/s (3,3 m/min)	5,83 mm/s (35 cm/mim)
	Ar +25% He.	58,3 mm/s (3,5m/min)	6,17 mm/s (37 cm/min)
	Ar + 0,2% O_2	55 mm/s (3,3 m/min)	5,83 mm/s (35 cm/mim)
MIG Pulsado CA	Ar Puro	68,3 mm/s (4,1 m/min)	7,25 mm/s (43,5 cm/min)
	Ar +25% He.	70 mm/s (4,2 m/min)	7,42 mm/s (44,5 cm/min)

Uma constatação feita durante este estudo é a pouca robustez do processo MIG quando aplicado ao alumínio. Para a condição pulsado CC+, uma grande quantidade de ensaios preliminares foi conduzida e as análises foram feitas a partir dos melhores resultados. A análise de estabilidade da modalidade MIG Pulsado CC+ foi feita por intermédio de gráficos que mostram a distribuição dos valores de tensão. Estes mostraram resultados condizentes com o que foi observado durante os ensaios. Para a análise de estabilidade da modalidade MIG Pulsado CA, os gráficos de distribuição dos valores de tensão não traduziram adequadamente o que foi observado durante os ensaios. Para prover alguma análise, foram construídos diagramas de tensão-corrente que mostraram a regularidade constatada durante os

experimentos na condição pulsado CA. Estes métodos de avaliação serão explicados no decorrer da apresentação destes resultados.

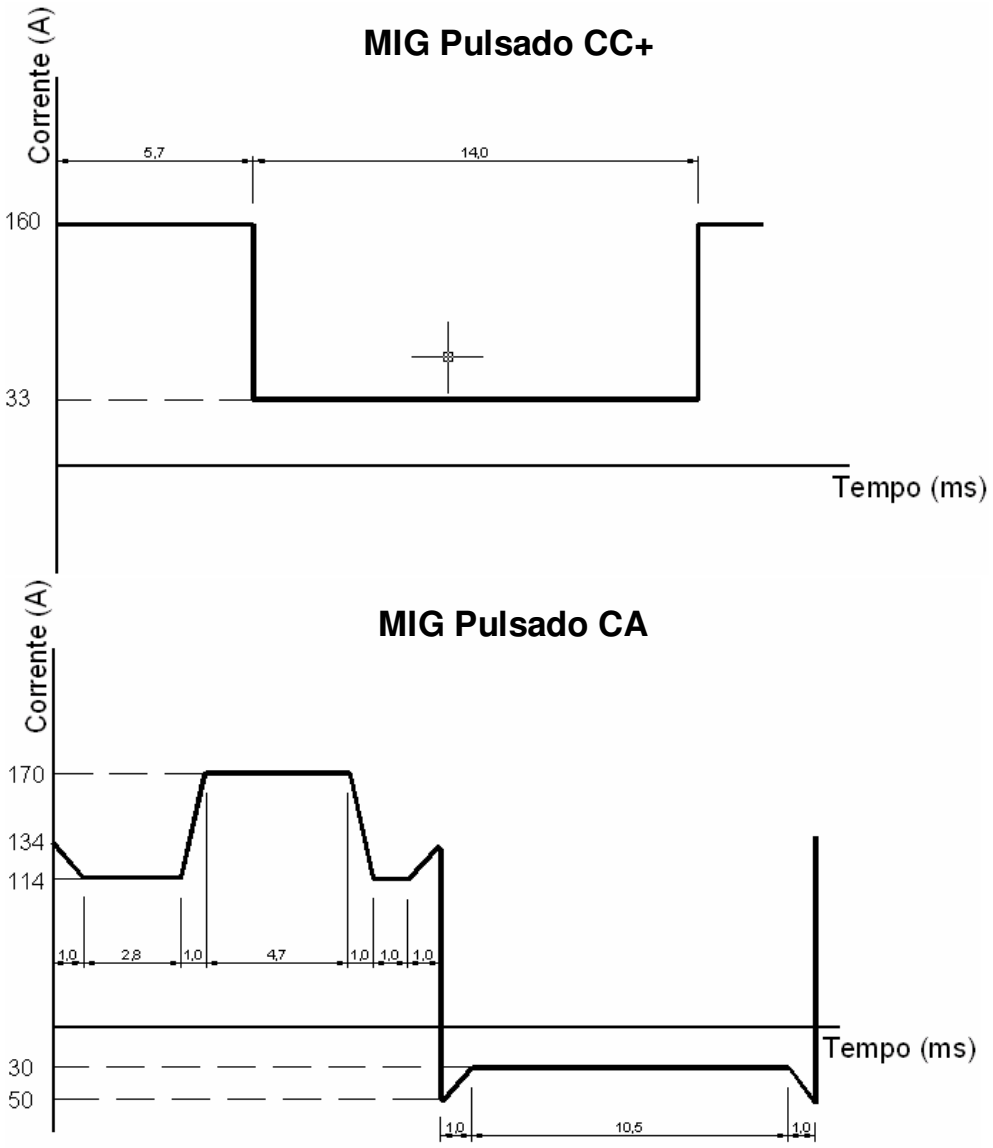


Figura 28 - Formatos de onda para as condições CC+ e CA.

Um exemplo da baixa repetividade (baixa robustez) do processo MIG aplicado ao alumínio está na Figura 47, que mostra cordões de solda realizados em experimentos com MIG Pulsado CC+ utilizando a mistura 75% Ar + 25% He como gás de proteção. Acompanhando as fotografias dos cordões de solda, é apresentado também o diagrama tensão-corrente (ou ciclograma) [58] correspondente, construído a partir dos dados registrados pelo sistema de aquisição para cada ensaio. Este método é comumente usado para a avaliação da regularidade de transferência metálica por curto-circuito [59], tendo seu uso estendido para

avaliar a regularidade de um sistema MIG Pulsado [45]. Neste tipo de avaliação, quanto maior a sobreposição das curvas, maior a regularidade do processo durante a soldagem. A primeira soldagem produziu o cordão de solda (a) da Figura 47, bastante limpo e regular, características muito boas no aspecto visual. Não há maiores evidência da ocorrência de curtos-circuitos ou de variação de comprimento de arco (faixa de limpeza catódica regular). O diagrama tensão-corrente (b) vem corroborar isto, mostrando grande coincidência de curvas que, além disso, ocupam uma pequena região do gráfico. Isto também é um indício de regularidade. O do cordão de solda (c) tem aparência bastante razoável, porém sabe-se que ocorreram curtos-circuitos pelas manchas de fuligem. Isto também fica nítido no diagrama tensão-corrente em (d) onde aparecem picos de corrente de aproximadamente 350 A a uma tensão bastante baixa. Embora a soldagem tenha ocorrido nas mesmas condições, a dispersão das curvas foi significativamente maior, evidenciando irregularidades do processo.

Outro aspecto constatado já durante os testes iniciais com a modalidade MIG pulsado CC+, foi que a mistura Ar + 0,2% O_2 não é efetiva em eliminar completamente os problemas de oscilação de comprimento de arco da forma esperada. A utilização de um arco médio ou longo resultou nas mesmas variações de comprimento de arco do que os outros gases testados. Na utilização de um comprimento de arco bastante curto, permitindo a ocorrência de curtos-circuitos ocasionais, esta mistura resultou em um comprimento arco mais estável em relação aos outros gases. Esta foi uma estratégia adotada para se conseguir alguma robustez, completar a série de ensaios a ser realizada e se ter a avaliação desta modalidade. Contudo, sabe-se que esta condição não é a ideal. Nas mesmas condições de arco curto, os gases de proteção Ar Puro e 75 %Ar + 25% He, apresentaram boa estabilidade, contudo, em algumas ocasiões aconteceu o aumento do comprimento de arco em direção ao bico de contato.

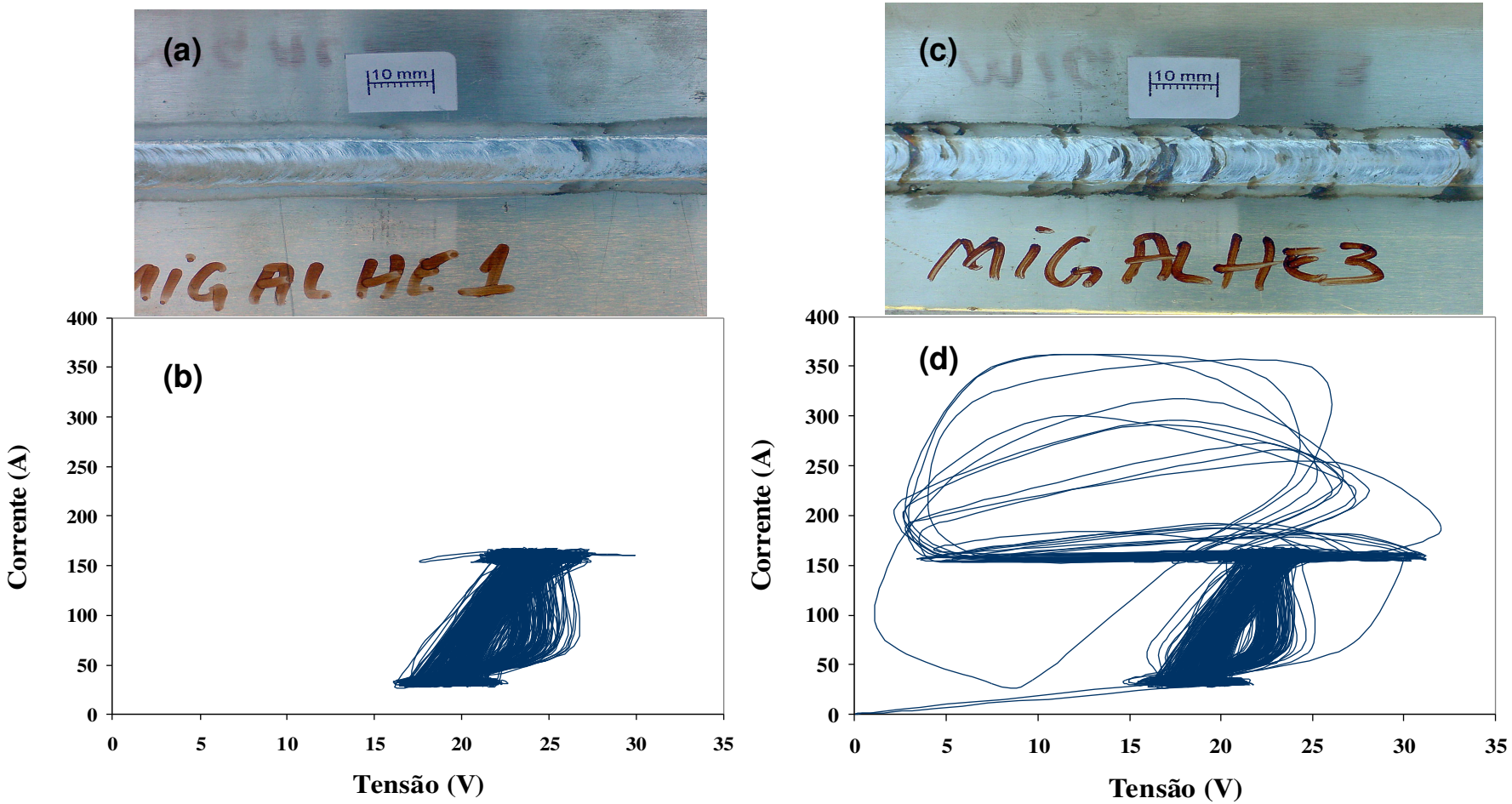


Figura 47 – Diagramas tensão-corrente para dois ensaios que realizados na mesma condição mostram situações de (a, b) boa regularidade e (c, d) razoável regularidade com presença de curtos-circuitos. Gás de proteção empregado: 75% Ar + 25% He.

Os resultados comentados no parágrafo anterior são essencialmente frutos da observação, logo uma avaliação mais sólida se faz necessária. É o que é mostrado a seguir, fundamentado na análise estatística dos dados coletados. Em processos a arco, a tensão de soldagem está diretamente relacionada ao comprimento do arco, ou seja, para um conjunto de parâmetros, variações de comprimento de arco correspondem a variações de tensão. Com o intuito de medir a variação de comprimento do processo na utilização de um gás ou outro para MIG Pulsado CC+, foram construídos gráficos mostrando a distribuição dos valores de tensão para os períodos de base e de pulso (Figura 48). Estes gráficos foram construídos tendo como base os dados coletados durante os experimentos. Uma planilha de cálculos comercial foi utilizada para o tratamento dos dados de tensão (separar os valores de tensão correspondentes a base e pulso) e a construção dos gráficos e a análise é idêntica a de um histograma. Os dados de tensão foram arregimentados em intervalos de 0,5 V e após isto, a percentagem em relação ao total de dados coletados [%] foi calculada para cada intervalo. Organizado os dados, foi simples construir os gráficos.

A distribuição mais estreita, apresentada pelos gráficos correspondentes à mistura Ar + 0,2%O_2, indica que os valores de tensão (e o comprimento de arco, conseqüentemente) variaram dentro de uma faixa mais estreita. O maior valor encontrado na tensão média, obtido na mistura Ar + 0,2% O_2, também é um indicativo da maior estabilidade do comprimento de arco.

A utilização da modalidade MIG Pulsado CA proporcionou soldagens com boa estabilidade de comprimento de arco e não houve necessidade de se utilizar a estratégia de arco curto, empregada durante os experimentos com MIG Pulsado CC+, para completar as séries de ensaios. Não se observaram diferenças significativas no quesito estabilidade entre os dois gases de proteção empregados neste conjunto de experimentos (Ar Puro e 75% Ar + 25% He). No entanto, é preciso ressaltar que não houve melhoria na robustez do processo. Em testes subseqüentes, realizados nas mesmas condições, a modalidade MIG pulsado CA mostrou-se tão pouco robusto (baixa repetitividade) quanto em CC+.

Uma avaliação estatística nos mesmos termos da realizada para a condição pulsado CC+ foi empregada para os ensaios realizados em CA. No entanto, diferentemente da análise mostrada na Figura 48, os resultados apresentados na Figura 49 não condizem com o que foi

observado. Os gráficos mostram curvas largas e com valor muito baixo no ponto médio, o que, isoladamente, leva a crer que as soldagens CA foram muito mais instáveis do que nas soldagens em CC+, quando na verdade, exatamente o contrário foi observado.

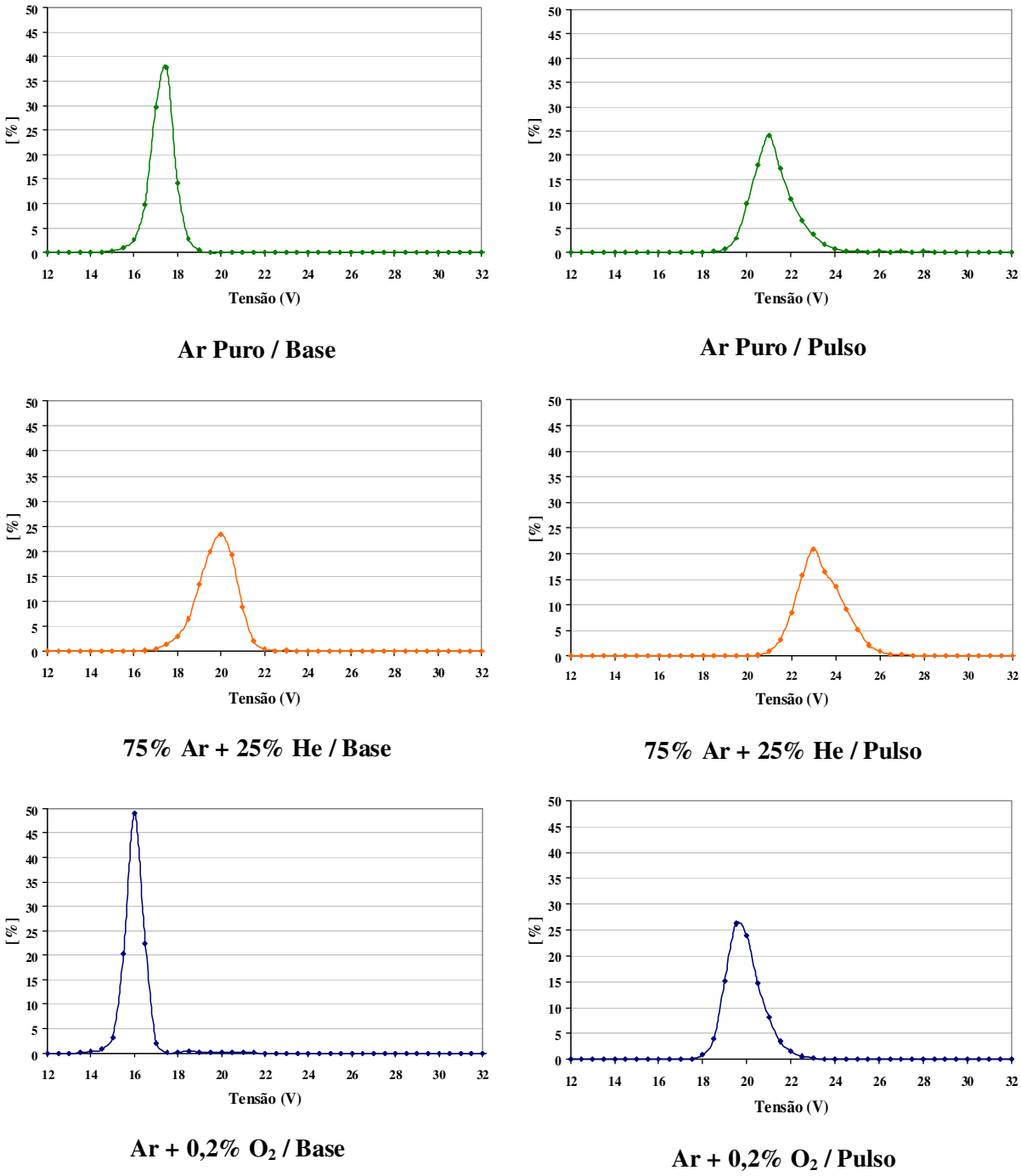


Figura 48 – Distribuição dos valores de tensão para a fase de base e pulso para MIG Pulsado CC+.

Com a intenção de prover uma avaliação que traduza melhor com o que foi observado, a Figura 50 mostra diagramas de tensão-corrente para alguns ensaios com MIG Pulsado CA

que, apesar de algumas curvas dispersas, mostram boa coincidência entre estas, evidenciando boa regularidade durante a soldagem.

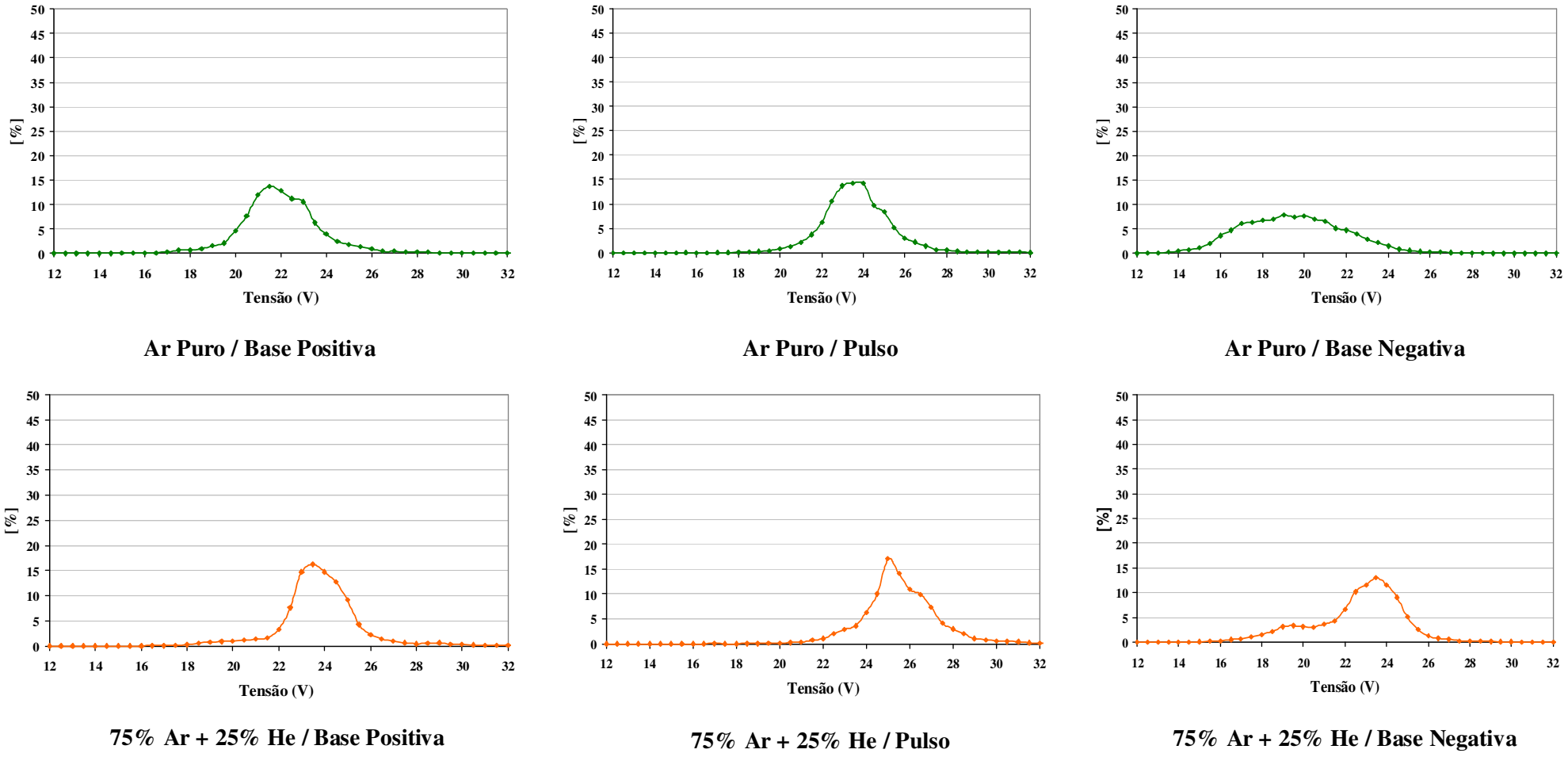
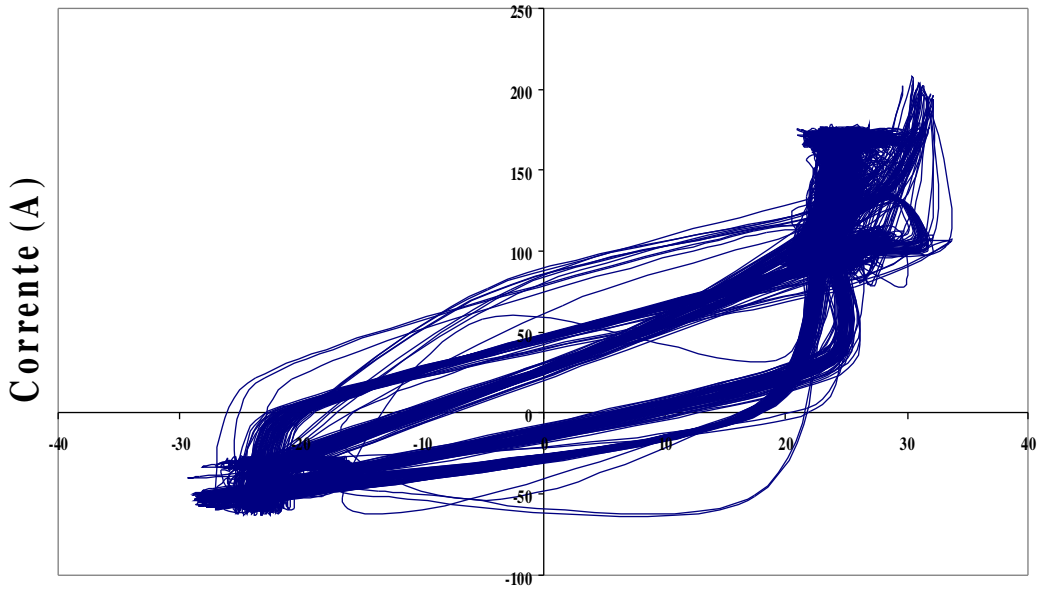
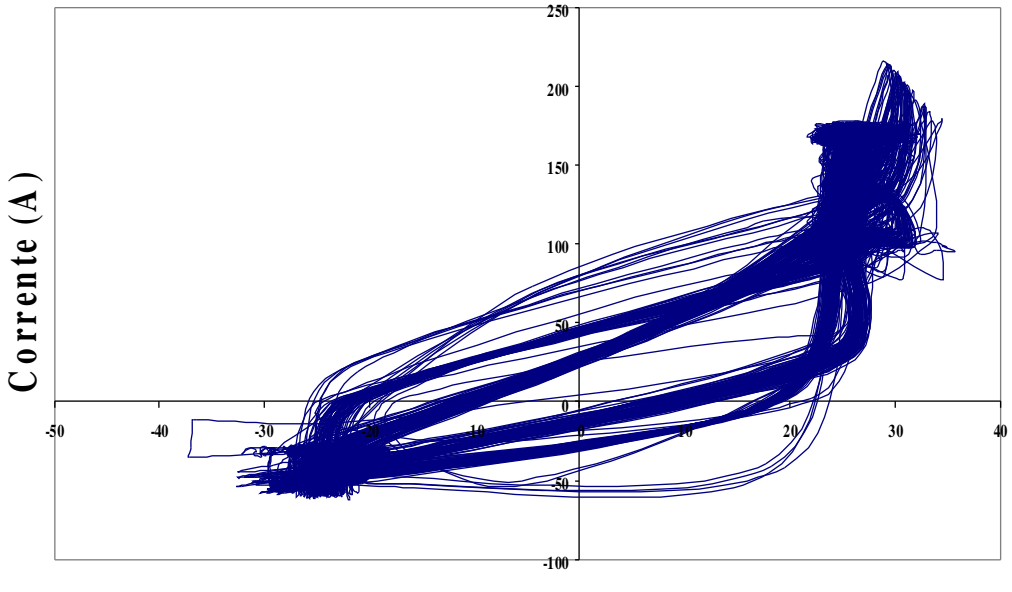


Figura 49 – Distribuição dos valores de tensão para as fases de pulso, base e base negativa na modalidade MIG Pulsado CA.



MIG Pulsado CA / Ar Puro



MIG Pulsado CA / 75% Ar + 25% He

Figura 50 – Diagramas tensão-corrente para o processo MIG Pulsado CA.

4.4.2 Aspecto Superficial

A Figura 51 mostra os melhores resultados para cada combinação modalidade / gás de proteção. Por intermédio de inspeção visual é possível perceber diferenças entre cada cordão de solda produzido e os efeitos que os diferentes gases causam sobre estes. O cordão de solda referente à combinação MIG Pulsado CC+ / Ar + 0,2% O_2 produziu soldas de aspecto superficial apenas razoável, caracterizado por um cordão mais "escamado" quando comparadas aos outros gases utilizados. É possível notar a presença de uma faixa contínua de fuligem nas redondezas de cada cordão, que pode ser atribuído à ocorrência de curtos-circuitos durante a soldagem somada à presença de O_2 no gás de proteção. Um aspecto benéfico desta mistura está na diminuição da faixa opaca causada pela limpeza catódica. A causa desta diminuição deve estar no fato de o O_2, apesar da pequena porção presente na mistura, causar a oxidação da poça de fusão, limitando a ação do arco voltaico sobre as adjacências do cordão de solda. O cordão de solda seguinte, referente a MIG Pulsado CC+ / Ar Puro, mostra acabamento bastante liso e boa aparência superficial. A presença de manchas ao longo do cordão, provavelmente é devida à ocorrência de curtos-circuitos. A faixa de limpeza catódica é mais larga, indicando uma ação mais ampla do arco voltaico sobre a região de soldagem. A soldagem realizada com MIG Pulsado / 75% Ar + 25% He mostra características semelhantes ao Ar Puro, em aspecto superficial, contudo os cordões de solda apresentaram maior molhabilidade, devido à presença de hélio na composição.

Nas condições MIG Pulsado CA / Ar Puro e MIG Pulsado CA / 75% Ar + 25% He, os cordões de solda não apresentaram grandes diferenças entre si, a não ser pelo fato de que com o segundo gás se obteve maior molhabilidade. Apresentaram também uma faixa de limpeza catódica um pouco maior em comparação aos cordões realizados com a modalidade Pulsado CC+, devido ao fato de que se conseguiu utilizar um arco mais alto.

Figura 51 - Aspecto superficial característico dos cordões de solda obtidos.

4.4.3 Análise da Zona Fundida

Em todas as amostras analisadas, encontrou-se algum grau de porosidade. O desenvolvimento de porosidades na soldagem do alumínio deve-se sobretudo a inclusões de hidrogênio no metal de solda. A solubilidade deste elemento no alumínio líquido é muito maior do que no alumínio sólido [60] e, por conseguinte, durante a rápida solidificação, o hidrogênio fica confinado no metal de solda. O oxigênio, utilizado em uma das misturas testadas, apresenta baixa solubilidade no alumínio líquido, portanto não tem grande importância na formação de porosidades [61].

A Figura 52 mostra as macrografias de todas as amostras para cada combinação modalidade / gás de proteção. Para a modalidade MIG Pulsado CC+, as amostras correspondentes a mistura Ar + 0,2% O_2 apresentaram uma linha de fusão mais bem delineada que nos outros gases e não houve casos de excesso de fusão nas faces e as falhas de fusão foram pequenas. O gás de proteção, ao provocar a oxidação da poça de fusão pode ter proporcionado maior concentração do arco na raiz da junta, evitando maior espalhamento do arco nas faces.

Ainda para MIG Pulsado CC+, as amostras soldadas com 75% Ar +25% He apresentaram um perfil menos definido e excesso de fusão nas faces da junta em relação às outras amostras soldadas com os outros dois gases. Possivelmente, isto ocorreu devido à melhor capacidade de troca de calor do hélio em relação aos outros gases. As amostras correspondentes a este gás apresentaram deformações na parte posterior ao cordão de solda. A ocorrência destes defeitos poderia ser corrigida, por exemplo, com o aumento da velocidade de soldagem mas poderia aumentar algumas falhas de fusão que ocorreram nestas soldas.

As macrografias correspondentes condição pulsado CA, apresentadas na Figura 53, mostram um perfil bem definido para os dois gases de proteção empregados, porém, pequenas falhas de fusão ocorreram. As amostras dos cordões de solda realizados com 75% Ar +25% He, apresentam maior molhabilidade em comparação as amostras de Ar Puro e maior fusão nas faces da junta, porém, não em excesso. É possível notar que as faces dos cordões de solda realizadas com esta mistura são côncavas, o que é negativo em termos de resistência e concentração de tensões.

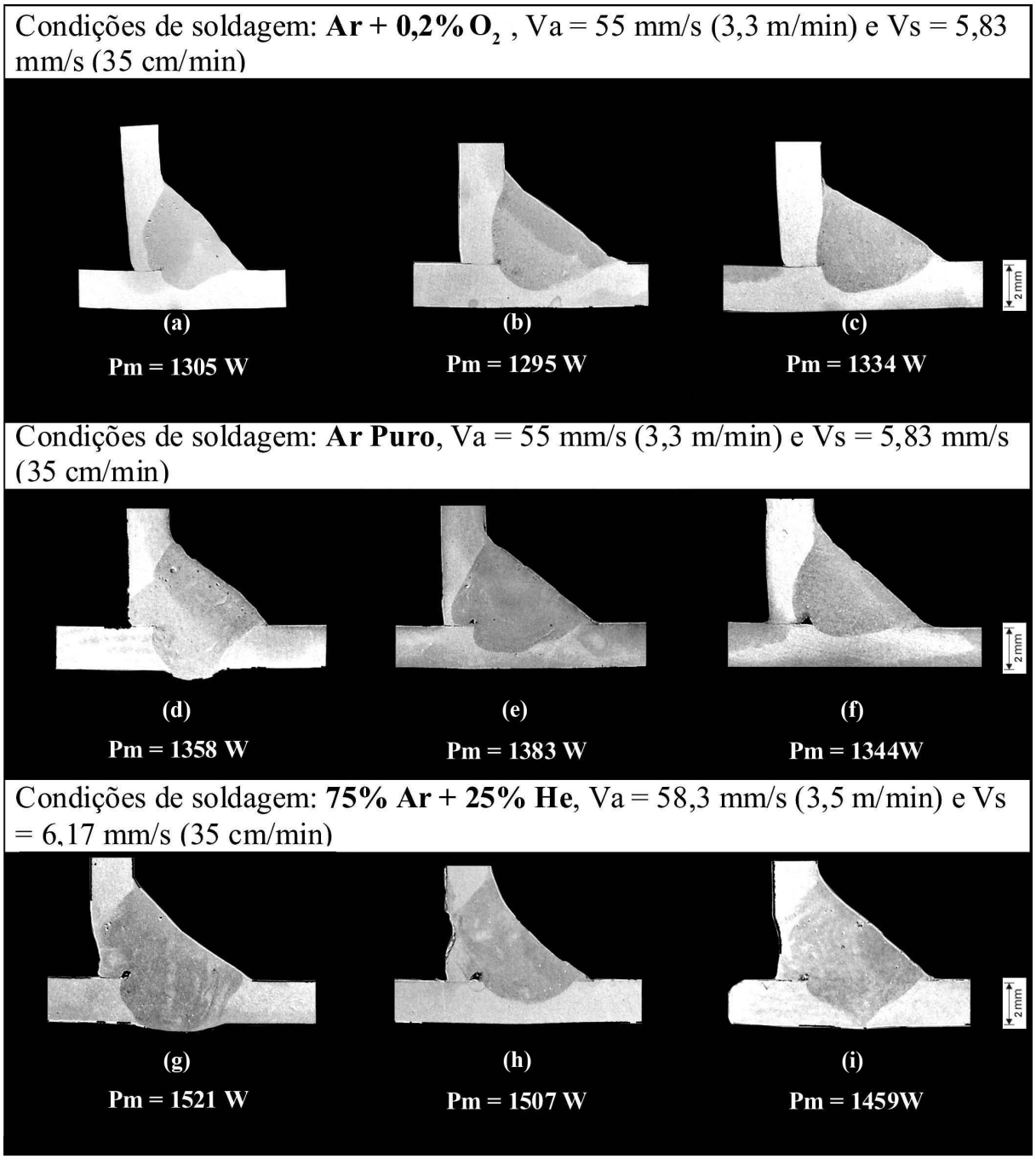


Figura 52 - Macrografias referentes a condição pulsado CC+.

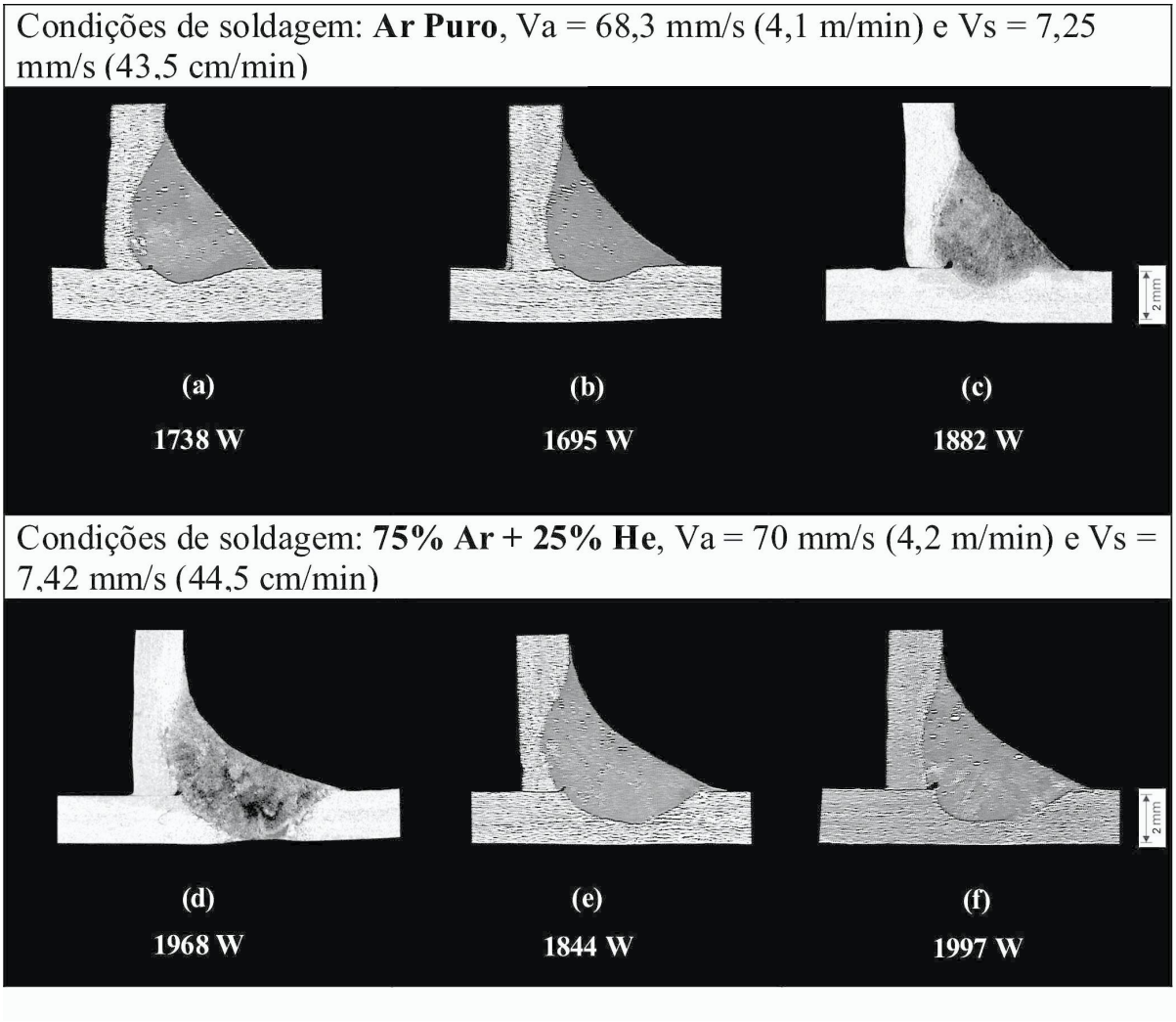


Figura 53 - Macrografias referentes a condição pulsado CA.

CAPÍTULO 5

Conclusões

- Os resultados obtidos com TIG CA, variando o tempo da polaridade positiva, evidenciaram uma tendência crescente de penetração e área fundida em valores de %EP entre 20% até 50%.

- Para as condições de soldagem dos experimentos com TIG CA (variando o tempo de polaridade positiva), a situação de menor desgaste do eletrodo e mais indicada para se ter boa penetração é com apenas 6,5% de %EP, que para o alumínio se revelou suficiente em termos de limpeza catódica.

- Para as condições de soldagem dos experimentos com TIG CA (variando a corrente), a corrente positiva teve menor influência na limpeza catódica do que o tempo de polaridade positiva.

- Para o processo TIG CA, a intensidade da corrente regulada durante as fases positivas surtiu efeito sobre a geometria dos cordões de solda analisados. Mesmo com a diminuição das correntes negativas, houve um aumento na largura dos cordões, assim como na penetração e área fundida à medida que se aumentava a corrente positiva.

- No processo MIG/MAG, é possível se obter cordões de boa aparência superficial na condição CC-, em uma condição de corrente alta (260 A) e utilizando um gás de proteção com algum teor oxidante (neste caso, 2% O_2). Houve uma diminuição nas características penetração de solda e área fundida em CC- em relação à condição CC+.

- Na comparação entre as duas modalidades MIG Pulsado na soldagem do alumínio, o processo em CA mostrou-se mais estável que em CC+. Contudo, os problemas de falta de robustez (baixa repetividade) persistiram em testes subseqüentes.

- Para a modalidade MIG Pulsado CC+, o emprego da mistura Ar + 0,2% O_2 não se mostrou eficiente em eliminar a variação de comprimento de arco que muitas vezes ocorre na soldagem MIG do alumínio.

CAPÍTULO 6

Sugestões para trabalhos futuros

- Nos estudos concernentes ao processo TIG CA, se obteve uma condição bastante favorável para a soldagem do alumínio quando %EP = 6,5% (eficiência de fusão satisfatória, faixa de limpeza catódica estreita e mínimo desgaste do eletrodo de tungstênio). Entretanto, estes resultados estão limitados às condições dos experimentos. Com base nisto, testar a condição %EP = 6,5% em juntas do tipo filete e topo, por exemplo, e comparar os resultados com a condição %EP = 50% (onde se teve grande eficiência de fusão a custo do desgaste intenso do eletrodo). Com isso será possível avaliar a influência da junta na eficiência de fusão do processo TIG CA e também determinar, em uma situação mais próxima da real, qual a condição mais adequada para cada tipo de junta.

- Avaliar o comportamento do arco no processo MIG/MAG nas polaridades CC+ e CC- para outros gases de proteção (com Ar, He e misturas destes com CO_2). Comparar estes gases com o gás utilizado no estudo deste trabalho no que diz respeito à estabilidade da transferência metálica.

- Realizar experimentos com o intuito de avaliar a viabilidade de um processo MIG/MAG Pulsado totalmente na polaridade negativa (CC-). A mistura 98% Ar + 2% O_2 mostrou-se bastante eficiente para estabilizar o processo e pode ser testada neste caso. Se viável, um processo como este pode ser de extrema valia para a realização de revestimentos de reparo em dutos, por exemplo.

- Avaliar outros métodos para tentar estabilizar o comprimento do alumínio na soldagem do alumínio, como sistemas de controle de comprimento de arco.

.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] FUERSCHBACH, P.W. Cathodic Cleaning and Heat Input in Variable Polarity Plasma Arc Welding of Aluminum. **Welding Journal**, v. 77, n. 07, p. 76s-85s, fev. 1998.

[2] LESNEWICH, A. Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding Part I – Control of Electrode Melting Rate. **Welding Journal**, n. 08, p. 343s-353s, ago. 1958.

[3] GERKEN, J.M. **Gas Tungsten Arc Welding**. James F. Lincoln Arc Welding Foundation. 42 p.

[4] SUBAN, M.; TUSEK, J. Dependence of Melting Rate in MIG/MAG Welding on the Type of Shielding Gas Used. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 119, p. 185-192, dez. 2001.

[5] American Society for Metals. **ASM Handbook - Corrosion** – ASM, 1992. Vol. 1.

[6] MATHERS, G. **The Welding of Aluminium and its Alloys**. 1. ed. Cambridge: CRC Press, 2002. 233 p.

[7] LABORATÓRIO DE SOLDAGEM E ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS. **Introdução à Física do Arco Voltaico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais**. Apostila de autoria do Profº. Paulo J. Modenesi. Disponível em < http://www.demet.ufmg.br/labs/soldagem/ >. Acessado em 15/10/2008.

[8] NEMCHINSKY, V.A. The Effect of the Type of Plasma Gas on Current Constriction at the Molten Tip of an Arc Electrode. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 29, n. 5, mai. 1996.

[9] CUNHA, T.V. **Desenvolvimento de Equipamento e de Metodologia de Parametrização para a Soldagem Orbital TIG**. 2008. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

[10] LANCASTER, J.F.; **The Physics of Welding**. 2. ed. Pergamom Press, 1986. 335 p.

[11] GUILE, A.E. Processes at Arc Cathode Roots on Nonrefractory Metals Having Films of Their Own Oxide. **Arc Physics and Weld Pool Behaviour**, p. 79-86, 1979.

[12] American Society for Metals. **ASM Handbook - Welding Brazing and Soldering**. ASM, 1993. Vol. 6.

[13] MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BACARENSE, A.Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. 362 p.

[14] SAEDI, H.R. **Transient Response of Plasma Arc and Weld Pool Geometry for GTAW Process**. 1986. 142 f.. PhD Dissertation, Massachusetts Institute of Techonology, Cambridge.

[15] American Welding Society. **Welding Handbook - Welding Processes**. AWS, 1991**.** Vol. 2, 955 p**.**

[16] SCOTTI, A.; DUTRA, J.C.; FERRARESI, V.A. The Influence of Parameter Settings on Cathodic Self-Etching During Aluminum Welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 100, p. 179-187, abr. 2000.

[17] YARMUCH, M.A.R.; PATCHETT, B.M. Variable AC Polarity GTAW Fusion Behavior in 5083 Aluminum. **Welding Journal**, v. 86, n. 02, p. 196s-200s, jul. 2007.

[18] COBINE, J.D. **Gaseous Conductors**. McGraw-Hill, 1941.

[19] VONENGEL, A. **Ionized Gases**. Clarendon Press, 1965.

[20] LABORATÓRIO DE SOLDAGEM E ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS. **Introdução aos Processo de Soldagem**. Apostila de autoria do Profº. Paulo J. Modenesi e do Profº. Paulo Villani Marques. Disponível em < http://www.demet.ufmg.br/labs/soldagem/ >. Acessado em 1/11/2008.

[21] TALKINGTON, J. **Variable Polarity Gas Metal Arc Welding**. 1998. 113 f. MSc Dissertation, The Ohio State University.

[22] ESSERS, W.G.; WALTER, R. Some Aspects of the Penetration Mechanisms in Metal-Inert-Gas (MIG) Welding. **Arc Physics and Weld Pool Behaviour**, p. 289-300, 1979.

[23] TONG, H.; UEYAMA, T.; HARADA, S.; USHIO, M. Quality and Productivity in Aluminium Alloy Thin Sheet Welding Using Alternating Current Pulsed Metal Inert Gas Welding System. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 6, n. 4, 2001.

[24] UEYAMA, T.; TONG, H.; HARADA, S.; PASSMORE, R.; USHIO, M. AC Pulsed GMAW Improves Sheet Metal Joining. **Welding Journal**, v. 84, n. 2, fev. 2005.

[25] SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG Melhor Entendimento Melhor Desempenho**. São Paulo: Editora Artliber, 2008. 283 p.

[26] ESSERS, W.G.; WALTER, R. Heat Transfer and Penetration Mechanisms with GMA and Plasma-GMA Welding. **Welding Journal**, v. 60, n. 2, p. 37s-42s, fev. 1981.

[27] HU, J.; TSAI, H.L. Heat and Mass Transfer in Gas Metal Arc Welding. Part II: The Metal. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 50, p.808-820, mar. 2007.

[28] RODRIGUES, C.E.A.L. **Avaliação Cinemática e Dinâmica da Transferência Metálica na Soldagem MIG/MAG**. 2007. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia – UFU.

[29] PALANI, P.K.; MURUGAN, N. Selection of Parameters of Pulsed Current Gas Metal Arc Welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 172, p. 1-10, Jul. 2005.

[30] INFOSOLDA . **Um Algoritmo Não-linear para Controle Sinérgico de Equipamentos para Soldagem MIG Pulsada do Alumínio**. Artigo de autoria do Profº. Louriel Vilarinho e Profº. Américo Scotti. Disponível em < http://www.infosolda.com.br/downloads.asp?arvoreID=61&ConteudoDescID=12#>. Acessado em 01/11/2008.

[31] DUTRA, J.C.; OLLÉ, L. F.; KIRST, E. R. Uma Contribuição ao Estudo da Seleção de Variáveis na Soldagem MIG/MAG Pulsada. **Anais do Congresso Regional Latino-Americano de soldagem**, v. 2, p. 925-942, Rio de Janeiro. ABS, 1992.

[32] AMIN, M. Pulse Current Parameters for Arc Stability and Controlled Metal Transfer in Arc Welding. **Metal Construction**, v. 15, n. 5, p. 272-278, mai. 1983.

[33] SUBRAMANIAM, S.; WHITE, D.R; JONES, J.E.; LYONS, D. W. Droplet Transfer in Pulsed Gas Metal Arc Welding of Aluminum. **Welding Journal**, v. 77, n. 11, p. 458s-464, nov. 1998.

[34] BÁLSAMO, P.S.S.; VILARINHO, L.O.; SCOTTI, A. Comparação de uma Nova Concepção do Sistema Sinérgico com um Sistema Sinérgico Comercial na Soldagem MIG Pulsado de Aço Inoxidável. **Soldagem & Inspeção**, ano 7, n. 1, set. 2002.

[35] AMIN, M. Synergic Pulse MIG Welding. **Metal Construction**, v. 13, n. 6, p. 349-353, jun.1981.

[36] SANTOS, T.F. **Soldagem MIG com Corrente Alternada**. 2008. 101 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

[37] HARWIG, D.D.; DIERKSHEIDE, J.E.; YAPP, D.; S. BLACKMAN. Droplet Burnoff Rate Measurements on the VP-GMAW Process**. IIW-Document-No. XII-1858-05,** 2005. 24 p.

[38] HARWIG, D.D.; DIERKSHEIDE, J.E.; YAPP, D.; S. BLACKMAN. Arc Behavior and Melting Rate in the VP-GMAW Process. **Welding Journal**, v. 85, n. 3, p. 52s-62s, mar. 2006.

[39] HARWIG, D.D. **Arc Behavior and Metal Transfer in VP-GMAW Process**. 2003. 153 f. PhD Dissertation, Cranfield University – School of Industrial and Manufacturing Science.

[40] NASCIMENTO, A.S.; FERNANDES, D.F.; VILARINHO, L.O. Metodologia para Determinação de Parâmetros para Soldagem MIG com Polaridade Variável. **Anais do XXXIII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem**, Caxias do Sul RS. ABS, 2007.

[41] NASCIMENTO, A.S.; FERNANDES, D.F.; MOTA, C.A.M.; VILARINHO, L.O. Metodologia para Determinação de Parâmetros para Soldagem MIG com Polaridade Variável. **Soldagem & Inspeção**, v. 13, n. 2, p. 97-104, abr-jun. 2008.

[42] FARIAS, J.P.; MIRANDA, H.C.; MOTTA, M. F.; PAIVA, F.D.Q.; PESSOA, E.F. Efeito da Soldagem MIG/MAG em Corrente Alternada sobre a Geometria de Solda. **Soldagem & Inspeção**, v. 10, n. 4, p 173-181. out-dez. 2005.

[43] BÖHME, D.; ROSENFELD, W.; BAUM, L.; CRAMER, H. MIG-Welding of Very Thin Al-Sheets by A.C. Pulsed Arc. **IIW-Document-No. XII-1720-02**, mai. 2002. 8 p.

[44] JOSEPH, A.; WEBB, C.; HARAMIA, M.; YAPP, D. Variable Polarity Improves Weld Brazing of Galvanized Sheet. **Welding Journal**, v. 80, n. 10, p. 36-40, out. 2001.

[45] ESSERS, W.G.; VAN GOMPEL, M.R.M. Arc Control with Pulsed GMA Welding. **Welding Journal**, v. 63, n. 6, p. 26-32, jun. 1984.

[46] MOYER, N. The Evolution of Shielding Gas. **Welding Journal**, v. 81, n. 9, p. 51-52, set. 2002.

[47] VAIDYA, V.V. Shielding Gas Mixtures for Semiautomatic Welds. **Welding Journal**, v. 81, n. 9, p. 43-48, set. 2002.

[48] MARYA, M.; EDWARDS, G.R.; LIU, S. An investigation on Effects of Gases in GTA Welding of a Wrought AZ80 Magnesium Alloy. **Welding Journal**, v. 83, n.07, p.203s-212s, jul. 2004.

[49] IMC-SOLDAGEM. **Manual do Equipamento**. Apresenta as características da fonte de soldagem Inversal 450. Disponível em <http://www.imc-soldagem.com.br/inversal.html>. Acessado em 16/09/2008.

[50] GOHR JR., R. **Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG**. 2002. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

[51] LOCATELLI, G. 2007. 160 f. **Uma Ferramenta Computacional para o Controle de Processo de Soldagem a Arco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

[52] LOCATELLI, G.; DUTRA , J.C. A Computacional Tool for the Control of Arc Welding Processes. **Welding and Cutting**, **v. 7, p. 293-298, jul. 2008**.

[53] INSTITUTO DE SOLDAGEM E MECATRÔNICA. **Manual do Sistema**. Apresenta características do SAP. Disponível em <http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/sap_1.php>. Acessado em 16/09/2008.

[54] IMC-SOLDAGEM. **Manual do Equipamento**. Apresenta as características do Tartílope V1. Disponível em < http://www.imc-soldagem.com.br/tartilope_v1.html>. Acessado em 16/09/2008.

[55] American Society for Metals. **ASM Handbook - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials**. ASM, 1992. Vol. 2.

[56] BARHORST, S. The Cathodic Etching Technique for Automated Aluminum Tube Welding. **Welding Journal**, v. 64 , n. 05, p. 28-31, mai. 1985.

[57] MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 3. ed. John Wiley and Sons, 2003. 706 p.

[58] SUBAN, M.; TUSEK, J. Methods for the Determination of Arc Stability. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 143, p. 430 -436, dez. 2003.

[59] ROCA, S.A.; FALS, H.C.; FERNÁNDEZ; K.B.; ADÁN, F.S. Application of U *versus* I Diagrams for Process Stability Evaluation in Gas Metal Arc Welding in Short Circuit Mode. **Soldagem & Inspeção**, v. 10, n. 2, abr/jun. 2005.

[60] PRAVEEN, P.; YARLAGADDA, P.K.D.V. Meeting Challenges in Welding of Aluminum Alloys Through Pulse Gas Metal Arc Welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 164-165, p. 1106-1112, mai. 2005.

[61] SILVA, C.L.M.; SCOTTI, A. The Influence of Double Pulse on Porosity Formation in Aluminum GMAW. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 171, p. 366-372, fev. 2006.