

SOLDAGEM MIG COM CORRENTE ALTERNADA
MIG CA

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

**SOLDAGEM MIG COM CORRENTE ALTERNADA
MIG CA**

Tese submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

DOCTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

TÚLIO FERNANDES DOS SANTOS

Florianópolis, abril de 2008

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

**SOLDAGEM MIG COM CORRENTE ALTERNADA
MIG CA**

TÚLIO FERNANDES DOS SANTOS

**Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de
DOUTOR EM ENGENHARIA
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA
sendo aprovada em sua forma final.**

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

Raul Gohr Junior, Dr. Eng. – Co-orientador

Prof. Fernando Cabral, Ph.D. - Coordenador do Curso

Banca Examinadora

Prof. Américo Scotti, Ph.D. - Relator

Prof. Alexandre Meirelles Pope, Ph.D.

Prof. Carlos Enrique Niño Bohórquez, Dr.Eng.

Prof. Berend Snoeijer, Dr. Ing.

Prof. Carlos Eduardo Iconomos Baixo, Dr. Eng.

O raciocínio estratégico, afinal, é um processo de adivinhação educada. Não é nem ciência nem arte; talvez seja uma arte científica ou uma ciência artística. Não há verdade de inspiração divina que se possa descobrir para se traçar destino de qualquer empresa. Há apenas o conceito mais elucidado para o sucesso que é possível com a aplicação das informações, energia e talento às questões. Requer um certo grau de humildade, uma disposição para questionar suas próprias certezas e, no mesmo tempo, disposição para assumir integralmente o compromisso com uma causa comum e levá-la em frente.

Karl Albrecht

AGRADECIMENTOS

À minha esposa pela compreensão incentivo e apoio em todos os momentos.

Aos meus filhos pela compreensão e carinho.

Aos meus irmãos pelo incentivo e apoio.

Ao meu orientador Prof. Jair Carlos Dutra por sua colaboração e atenção.

Ao meu co-orientador Raul Gohr Junior por seu comprometimento e dedicação.

Ao Prof. Américo Scotti por sua colaboração e atenção.

Aos meus amigos, colegas de estudo e de trabalho que me incentivaram.

À toda a equipe do Labsolda da UFSC.

À IMC – Soldagem.

À Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUC-PR.

À Universidade Federal de Santa Catarina –UFSC.

À Universidade Federal de Uberlândia – UFU.

À PETROBRAS – Petróleo Brasileiro SA.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	xi
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM MIG CA.....	6
2.2. FUNDAMENTOS DA ABERTURA DO ARCO MIG.....	22
2.3. FUNDAMENTOS SOBRE A RECUPERAÇÃO DE DUTOS EM OPERAÇÃO	24
3. ENSAIOS EXPLORATÓRIOS	26
4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	36
4.1. PROCEDIMENTO PARA ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE TENSÃO E COMPRIMENTO DE ARCO.....	36
4.2. METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO CONTROLE DO COMPRIMENTO DE ARCO	38
4.3. METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE TENSÃO DE BASE, CORRENTE DE BASE E COMPRIMENTO DE ARCO.....	42
4.4. METODOLOGIA PARA ESTUDO DA ABERTURA COM RETORNO DO ARAME.	45
4.5. METODOLOGIA PARA ESTUDO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS PARA O MIG CA DO AÇO	48
4.6. METODOLOGIA PARA ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE PENETRAÇÃO, TEMPERATURA E TEMPO EM POLARIDADE NEGATIVA	52
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5.1. RELAÇÃO ENTRE TENSÃO, CORRENTE E COMPRIMENTO DE ARCO.....	55
5.2. CONTROLE DO COMPRIMENTO DE ARCO	57
5.3. RELAÇÃO ENTRE TENSÃO DE BASE, CORRENTE DE BASE E COMPRIMENTO DE ARCO.....	60
5.4. ABERTURA DO ARCO COM RETORNO DO ARAME.....	64
5.5. CONDIÇÕES OPERACIONAIS PARA O MIG CA DO AÇO	69
5.6. ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE PENETRAÇÃO, TEMPERATURA E TEMPO EM POLARIDADE NEGATIVA	74
6. ENSAIOS COMPLEMENTARES	83
6.1. MIG CA DO ALUMÍNIO.....	83
6.2. MIG CA DO AÇO	85
7. CONCLUSÕES	92
8. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	95
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Formas de onda MIG Pulsado (a) e MIG CA (b)	2
Figura 2.1 - Relação entre Profundidade de penetração e Produto da quantidade de movimento pela frequência de gotas, conforme Essers e Walter (1979)	7
Figura 2.2 - Representação das linhas de densidade de corrente, apresentada por Nemchinsky (1996).....	8
Figura 2.3 - Influência do diâmetro do eletrodo e da polaridade na penetração, apresentada por Essers e Walter (1979).....	9
Figura 2.4 - Escalada do Arco Voltaico no MIG CA durante fase negativa.....	10
Figura 2.5 - Influência do comprimento do arco na exposição da gota (A5183, ϕ 1,6mm, Corrente > 150 A), conforme Kiyohara et al (1979)	10
Figura 2.6 - Comportamento do arco MIG do alumínio (Material: A5183 com 1,6 mm de diâmetro, gás Argônio), conforme Kiyohara et al (1979)	11
Figura 2.7 - Curva de igual consumo, alumínio, arame ER 4043 de 1,2 mm de diâmetro, velocidade de arame de 7 m/min e gás de proteção Argônio 15 l/min, conforme Locatelli e Silva (2005).	11
Figura 2.8 - Curva de igual consumo, alumínio, arame ER 4043 de 1,2 mm de diâmetro, velocidade de arame de 3,2 m/min e gás de proteção Argônio 15 l/min, conforme Locatelli e Silva (2005)	12
Figura 2.9 - Curva de igual consumo, aço E 70 S3, arame de 1,0 mm de diâmetro, velocidade de arame de 2 a 12 m/min e gás de proteção Argônio 15 l/min, apresentada por Quites e Dutra (1979)	13
Figura 2.10 - Curva de igual consumo, aço, arame ER-70 S6 de 1,2 mm de diâmetro, gás de proteção Argônio com 8% CO ₂ , 15 l/min, velocidade do arame de 3 m/min, conforme Locatelli e Silva (2005).....	13
Figura 2.11 - Relação entre o comprimento do eletrodo e a velocidade do arame para o aço, apresentada por Nemchinsky (1998)	14
Figura 2.12 - Gota repelida devido à polaridade negativa, apresentado por Nascimento et al (2007).....	15
Figura 2.13 - Modelo típico de forma de onda do MIG CA, apresentado por Gohr (2002)	17
Figura 2.14 - Onda MIG CA com pulso trapezoidal, conforme SENSARC (1992).....	17
Figura 2.15 - Variações de onda de corrente com pulso triangular estudadas por Böhme et al (2002).....	18

Figura 2.16 – Forma de onda com base positiva após o pulso, apresentada por Tong et al (2001).....	19
Figura 2.17 –Oscilograma de corrente, com controle atuando na modulação da frequência e da corrente de pulso, obtida em ensaio de soldagem do alumínio usando a fonte SENSARC AL3500.....	21
Figura 2.18 - Influência da geometria da ponta na abertura do arco, apresentada por Santos (2000).....	23
Figura 2.19 - Esquema da abertura do arco com ejeção da extremidade do arame construído com base nos estudos apresentados por Rehfeldt e Bremer (1993)	24
Figura 3.1 – Bancada de ensaios da PUC-PR.....	26
Figura 3.2 – Oscilogramas de tensão e corrente durante a extinção e reignição do arco.....	27
Figura 3.3 Oscilogramas de Corrente e Tensão - extinção do arco, alumínio, arame ER-4043 de 1,2 mm de diâmetro	28
Figura 3.4 – Forma de onda de corrente com pulsos anterior e posterior à mudança de polaridade, alumínio, arame ER-4043 de 1,2 mm de diâmetro.....	29
Figura 3.5 - Oscilogramas de Corrente e Tensão ($I_n = 15 \text{ A}$; $t_n = 50 \text{ ms}$), alumínio, arame ER-4043 de 1,2 mm de diâmetro	29
Figura 3.6 - Cordões depositados – Alumínio, chapa de 0,8 mm de espessura	30
Figura 3.7 - Junta sobreposta MIG CA – Alumínio, chapas de 1 mm de espessura	30
Figura 3.8 - Junta de filete MIG CA – Alumínio, chapa de 1 mm de espessura.....	30
Figura 3.9 - Depósito obtido com variação progressiva da distância bico peça.....	31
Figura 3.10 - Depósitos obtidos com variação discreta de distância bico peça (a)Variação de 3 mm e (b) Variação de 2 mm	31
Figura 3.11 - Relação entre Corrente média e amplitude e duração da base.....	32
Figura 3.12 - Comprometimento da limpeza catódica no MIG CA	33
Figura 3.13 - Filme protetor de chapas de alumínio.....	34
Figura 3.14 - Perfuração do metal de base durante reabertura do arco - Alumínio.....	34
Figura 3.15 - Aderência do arame durante a abertura, similar ao “ <i>stud welding</i> ”	35
Figura 4.1 – Forma de onda MIG CA com 5 intervalos.....	36
Figura 4.2 - Tela do programa MIG 2 AC.....	38
Figura 4.3 – Rotina de controle proporcional do MIG2AC	39
Figura 4.4 – Esquema do SICA – Sistema Integrado de Controle e Aquisição	39
Figura 4.5 - Conjunto SICA – Sistema Integrado de Controle e Aquisição.....	40
Figura 4.6 - Algoritmo do controlador PID.....	40
Figura 4.7 – Esquema de deslocamento com variação da distância bico peça.....	41

Figura 4.8 – Conjunto para ensaios com referencia visual de comprimento de arco	43
Figura 4.9 - Dispositivo para referenciar visualmente o comprimento do arco.	43
Figura 4.10 – Esquema dos ensaios com referência visual do comprimento de arco	43
Figura 4.11 – Forma de onda escalonada	44
Figura 4.12 – Forma de onda de corrente para verificação da validade da relação identificada entre a tensão e o comprimento de arco.....	45
Figura 4.13 – Esquema da abertura do arco com retorno do arame	46
Figura 4.14 – Placa de circuito de controle do retorno do arame	47
Figura 4.15 – Corpo de prova de ensaios de abertura com retorno do arame	48
Figura 4.16 - Bancada de ensaios de soldagem MIG CA do Labsolda – UFSC	49
Figura 4.17 - Sistema de deslocamento de tocha (Tartílope)	49
Figura 4.18 - Forma de onda MIG Pulsado CC ⁺ e CA.....	50
Figura 4.19 - Esquema do posicionamento dos termopares no corpo de prova	53
Figura 4.20 - Termopares instalados no verso da chapa.....	53
Figura 4.21 - Sistema de monitoração de temperatura	54
Figura 5.1 - Tensão média em cada intervalo e comprimento de arco.....	56
Figura 5.2 - Desvio padrão da tensão em cada intervalo e comprimento de arco.	56
Figura 5.3 - Oscilogramas de corrente e tensão correspondentes aos experimentos RDSC (inclinação de -30°, sem controle).....	57
Figura 5.4 - Oscilogramas de corrente e tensão correspondentes aos experimentos RSSC (inclinação de +30°, sem controle).....	58
Figura 5.5 - Oscilogramas de corrente e tensão correspondentes aos experimentos RDCC (inclinação de -30°, com controle)	58
Figura 5.6 - Oscilogramas de corrente e tensão correspondentes aos experimentos RDSC (inclinação de +30o, com controle).	59
Figura 5.7 - Comportamento da tensão de base (a) e do desvio padrão (b) com variação da DBCP.....	59
Figura 5.8 - Oscilogramas de Corrente e de Tensão com onda escalonada para comprimento de arco de 6 mm.....	60
Figura 5.9 - Tensão de base para comprimento de arco de 6 mm	61
Figura 5.10 - Tensão de base para comprimento de arco de 8 mm	61
Figura 5.11 - Tensão de base para comprimento de arco de 10 mm	61
Figura 5.12 - Tensão de base para comprimento de arco de 12 mm	62
Figura 5.13 - Superfície de resposta da Tensão em função da Corrente de base (I _b) e do comprimento do arco (a).....	63

Figura 5.14 - Gráfico comparativo entre Tensão de base: estimada e real ($I_b = 23 \text{ A}$).....	63
Figura 5.15 - Rampa de tensão após mudança de polaridade.....	64
Figura 5.16 - Oscilogramas de corrente e tensão - Tempo em retorno: (a) $t_{ret} = 50 \text{ ms}$; (b) $t_{ret} = 100 \text{ ms}$	65
Figura 5.17 - Oscilogramas de corrente e tensão - Corrente em retorno: (a) $I_{ret} = 50 \text{ A}$; (b) $I_{ret} = 100 \text{ A}$	65
Figura 5.18 - Oscilogramas de corrente e tensão – Velocidade do arame em retorno: (a) $V_{a ret} = 1 \text{ m/min}$; (b) $V_{a ret} = 2 \text{ m/min}$	66
Figura 5.19 - Oscilogramas de corrente e tensão - Influência da geometria da ponta do arame-eletrodo: (a) Ponta arredondada; (b) Ponta cortada	66
Figura 5.20 - Influência da velocidade de retorno e do tempo em retorno sobre a tensão de base	67
Figura 5.21 - Influência da corrente em retorno e do tempo em retorno sobre a tensão de base	68
Figura 5.22 - Influência da Corrente de abertura e do tempo em retorno sobre a energia demandada para a abertura.	68
Figura 5.23- Taxa de fusão em polaridade negativa.....	69
Figura 5.24 - Taxa de fusão MIG pulsado em polaridade positiva	70
Figura 5.25 - Taxa de fusão CC- e CC+	71
Figura 5.26 - Metalografias de cordões com diferentes períodos em polaridade negativa	73
Figura 5.27 - Cordões depositados com CC+ e CA	74
Figura 5.28 - Metalografias relativas aos experimentos em chapa de 4,7 mm (a)AC0034; (b)AC3034; (c)AC5034; (d)AC7034)	75
Figura 5.29 - Metalografias relativas aos experimentos em chapa de 3,2 mm (a)AC0033; (b)AC3033; (c)AC5033; (d)AC7033)	76
Figura 5.30 - Metalografias relativas aos experimentos em chapa de 2 mm (a)AC0032; (b)AC3032; (c)AC5032; (d)AC7032)	76
Figura 5.31 - Ciclos térmicos relativos aos experimentos em chapa de 4,7 mm (a)AC0034; (b)AC3034; (c)AC5034; (d)AC7034)	77
Figura 5.32 - Ciclos térmicos relativos aos experimentos em chapa de 3,2 mm (a)AC0033; (b)AC3033; (c)AC5033; (d)AC7033)	77
Figura 5.33 - Ciclos térmicos relativos aos experimentos em chapa de 2 mm (a)AC0032; (b)AC3032; (c)AC5032	78
Figura 5.34 - Relação entre %EN e Penetração.....	78
Figura 5.35 - Relação entre %EN e Temperatura.....	79

Figura 5.36 - Arco MIG CA na polaridade negativa (70%EN e In=60 A)	80
Figura 5.37 - Transferência metálica no MIG CA com Ar+8% CO ₂ (70% EN e In=60 A)	80
Figura 5.38 - Transferência metálica verificada por Nascimento et al (2007) com Ar+2% O ₂ (70% EN e IN=198 A).....	81
Figura 5.39 - Relação entre %EN e Tensão no pulso (AC0034;AC3034;AC5034 e AC7034)	81
Figura 5.40 - Relação entre % EN e Penetração para chapa 4,7 mm	82
Figura 6.1 - Depósitos MIG CA – Alumínio -(a) 0% EN; (b) 30% EN; (c) 50% EN; (d) 70% EN.	84
Figura 6.2 - Brazagem MIG CA – Alumínio & Aço (galvanizada); (a) aspecto após soldagem (b) aspecto após remoção de fuligem	85
Figura 6.3 - Influência da corrente e gás na escalada do arco	86
Figura 6.4 - Cordões depositados em chapa de aço de 3.2 mm de espessura (a) U7033; (b) U6043; (c) U5053; (d) U4063; (e) U7033O2; (f)U4063O2.	87
Figura 6.5 - Depósito de revestimento sobre chapa	89
Figura 6.6 - Metalografia do revestimento sobre chapa	89
Figura 6.7 - Detalhe da penetração do 1º cordão do revestimento sobre chapa.....	89
Figura 6.8 - Depósito de revestimento sobre tubo.....	90
Figura 6.9 - Metalografia do revestimento sobre tubo	90
Figura 6.10 - Detalhe da penetração do 1º cordão do revestimento sobre tubo	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Seqüência de intervalos para experimentos de identificação da relação Tensão x Comprimento de arco	37
Tabela 4.2 – Conjunto de experimentos com cinco intervalos e variação do comprimento de arco	37
Tabela 4.3 - Conjunto de experimentos para avaliação do controle baseado em modulação da amplitude da corrente de base	41
Tabela 4.4 - Conjunto de parâmetros e variáveis dos experimentos para avaliação do controle de comprimento de arco	42
Tabela 4.5 - Conjunto de experimentos com forma de onda escalonada e variação do comprimento de arco - Alumínio.....	44
Tabela 4.6 - Dados para experimentos de abertura do arco com corrente baixa e retorno do arame - Alumínio	47
Tabela 4.7– Experimentos MIG CA com forma de onda da Figura 4.18.....	51
Tabela 4.8 - Experimentos MIG CA com forma de onda da Figura 2.13	51
Tabela 4.9 - Experimentos MIG CA e CC com forma de onda da Figura 4.18	52
Tabela 4.10 - Conjunto de experimentos para avaliar a influência do % EN e espessura na penetração e temperatura	52
Tabela 5.1 - Média e desvio padrão da tensão em cada intervalo e comprimento de arco	55
Tabela 5.2 - Resultado dos experimentos para avaliação do controle baseado em modulação da amplitude da corrente de base.....	57
Tabela 5.3 - ANOVA Tensão de base - U_b (V)	62
Tabela 5.4 - Tensão de base após a abertura do arco e energia demandada.....	67
Tabela 5.5 - Taxa de fusão em polaridade negativa	69
Tabela 5.6 - Taxa de fusão MIG Pulsado em polaridade positiva.....	70
Tabela 5.7 - Experimentos MIG CA para avaliação da taxa de fusão.....	72
Tabela 5.8 - Influência do % EN, espessura e V_a na penetração e temperatura	75
Tabela 6.1 – Conjunto de variáveis para experimentos MIG CA – Al com diferentes percentuais de tempo em polaridade negativa	83
Tabela 6.2 - Experimentos com filmagem da escalada do arco no arame.....	86
Tabela 6.3 - ANOVA da escalada do arco	86

RESUMO

Com o objetivo de desenvolver a tecnologia de soldagem MIG CA, foram envidados esforços para criar soluções tecnológicas que assegurassem a operacionalidade do processo para o alumínio e para o aço. Os estudos resultaram no desenvolvimento do processo, dos equipamentos e sistemas de controle. A fonte de soldagem foi aprimorada para assegurar a reignição do arco durante a mudança de polaridade, um novo cabeçote de alimentação de arame foi concebido para permitir aplicação de uma nova técnica de abertura de arco, e programas computacionais foram desenvolvidos para a implementação dos controles propostos. A estabilidade do comprimento do arco foi considerada como fator fundamental para o processo e visando obtê-la, foi avaliado o uso da leitura da tensão como indicador do comprimento de arco. Foi proposto e avaliado um sistema de controle do comprimento do arco baseado na variação da corrente de base como forma de alterar a taxa de fusão do arame, e assim possibilitar o controle do comprimento do arco. O sistema proposto foi capaz de manter a estabilidade do comprimento do arco, entretanto, promoveu significativas variações na corrente média. Visando aperfeiçoar o sistema de controle, a relação entre a tensão e o comprimento do arco foi reavaliada, considerando a influência da variação da corrente, causada pelo próprio sistema de controle. Foi desenvolvida uma nova técnica de abertura do arco, usando o retorno controlado do arame, que resultou em abertura suave, com baixa energia e adequado comprimento do arco após a fase abertura. Foi identificada a oportunidade inovadora de utilização do MIG CA no aço, para a recuperação de dutos de petróleo em operação. Foram estabelecidas condições operacionais para o aço, proposta e avaliada uma metodologia para determinação da taxa de fusão do arame. Os resultados indicam que a taxa de fusão do arame pode ser estimada com base na corrente e tempo em cada polaridade. Foi observado o fenômeno de escalada do arco no arame-eletrodo durante a fase com polaridade negativa, e verificado que o gás de proteção e a amplitude de corrente exercem influencia na escalada do arco. Foram realizados experimentos para determinação da relação entre o percentual de tempo em polaridade negativa, a penetração e a temperatura, considerados aspectos críticos para a soldagem de dutos em operação. Os resultados indicam que o aumento do tempo em polaridade negativa resulta em redução da penetração. As temperaturas verificadas não indicaram risco de perfuração para esta aplicação. Os resultados sugerem que o processo MIG CA pode ser usado para a recuperação de dutos em operação com espessura remanescente acima de 2 mm. Os resultados indicam que variações de comprimento de arco podem exercer influência expressiva na penetração, sendo recomendável o uso de um sistema eficaz de controle de comprimento do arco para o processo MIG CA.

ABSTRACT

In order to developing the VP-GMAW process, were created technological solutions to assure the process operability with aluminum and steel. The studies resulted in the process, equipments and control systems development. The welding source has been improved to assure the arc reignition in polarity changes. A new wire feeder has been designed to enable the application of a new technique of arc opening. The arc length stability was considered critical to the process, and in order get it, the arc voltage was evaluated as an indicator of the arc length. It was proposed and evaluated a system to control the arc length using the base current level modulation to change the wire melting rate, and thus control the arc length. The proposed system has been able to maintain the arc length stability, however promoted great variations in mean current. Aiming to improve the control system, the relationship between the voltage and arc length was reviewed, considering the influence of the current level variations caused by the control system used. A new opening arc technique using the wire return control was created. It results in soft arc opening with low energy and appropriate arc length after the arc opening phase. It identified the opportunity for innovative VP-GMAW use on in-service oil pipelines repairs. Operating conditions were established for steel, and a methodology for determinate the wire melting rate was proposed. The results indicate that the wire melting rate can be estimated based on the current level and its duration in each polarity. The arc jumping on the wire electrode during the negative phase was observed. The results indicate that gas shield composition and the current level, influence the arc ascent. Experiments were performed to determine the relationship between the negative phase time, the penetration and the temperature, considered critical aspects to in-service welding pipelines. The results indicate that increased in negative phase time reduces penetration and the temperatures recorded indicated no risk of burnthrough for this application. The results suggest that the VP-GMAW can be used to in-service repair pipeline with thickness remaining above 2 mm. However variations in arc length can take great influence on the penetration, so is recommended the use of an effective arc length control system to VP-GMAW.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A tendência à utilização de soldagem com reduzida penetração e aquecimento é crescente, e freqüentemente está associada a aplicações tais como a união de chapas finas onde o risco de perfuração compromete a soldagem. O controle da penetração e aquecimento se constitui em diferencial estratégico quando consideradas aplicações como a recuperação de dutos em operação em indústrias de processo contínuo, onde os prejuízos decorrentes de paradas para reparos são expressivos.

A soldagem com reduzida penetração e aquecimento, pelo processo MIG tem como grande desafio o desenvolvimento de técnicas que promovam a redução controlada do calor transferido à peça, mantendo a qualidade e produtividade.

A polaridade convencionalmente usada no processo MIG é a positiva, CC^+ , que resulta em um processo estável, com bom acabamento superficial e boa penetração. Para a soldagem de peças finas, ocasiona o superaquecimento do metal de base, podendo provocar excessiva penetração ou mesmo a perfuração, além de deformação excessiva da peça, o que dificulta, ou até impossibilita, a soldagem de componentes finos ou com restrições ao aquecimento, casos freqüentemente atendidos pelo processo TIG.

Para viabilizar a soldagem pelo processo MIG, nos casos que demandam reduzido aquecimento do metal de base, foram identificadas algumas pesquisas, principalmente relacionadas à soldagem do alumínio, que indicam a soldagem MIG CA como uma técnica promissora para promover a transferência metálica adequada, com a redução controlada do calor transferido à peça.

O processo MIG CA é uma variação do processo MIG pulsado, em que é introduzido um intervalo com polaridade negativa na forma de onda de corrente, ou seja, enquanto o MIG pulsado apresenta dois intervalos, correspondentes a uma base positiva e um pulso positivo, Figura 1.1(a), o processo MIG CA possui adicionalmente uma base negativa, Figura 1.1(b). A utilização deste intervalo negativo promove variações tanto na taxa de fusão do arame como no calor transferido ao metal de base.

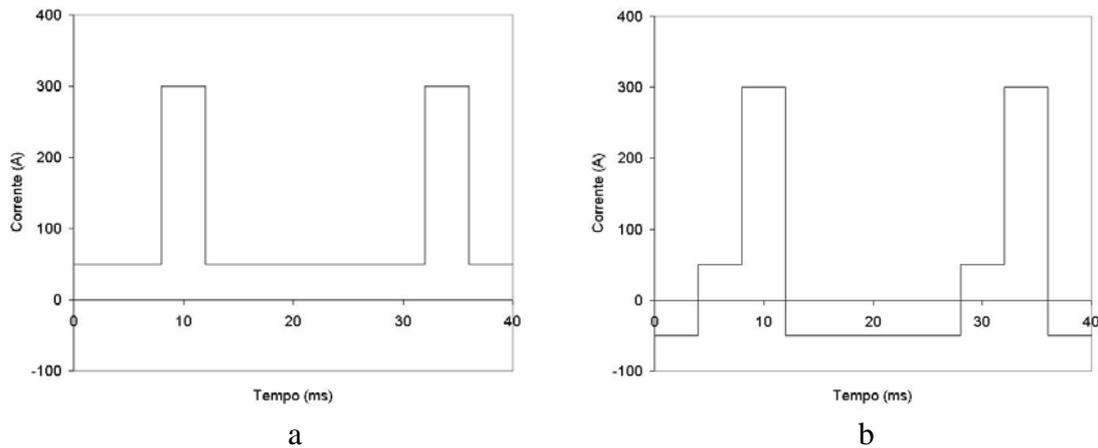


Figura 1.1 - Formas de onda MIG Pulsado (a) e MIG CA (b)

Tong et al (2001), mesmo sem dados conclusivos, expressa como opinião, que o processo MIG-CA é uma técnica ideal para resolver os principais problemas da soldagem de chapas finas de alumínio, entre os quais se destaca a fusão excessiva, com perfuração das chapas, a dificuldade de soldar quando ocorre afastamento entre chapas e a distorção das chapas provocadas pelo aquecimento.

O estado de evolução da tecnologia de soldagem pelo processo MIG-CA é ainda inicial, sendo observadas poucas ações exploratórias sobre o assunto. Isto se deve principalmente à falta de equipamentos com tecnologia adequada para pesquisas sobre este tema e falta de interesse comercial. Com base nas poucas pesquisas verificadas até o momento, o processo MIG CA tem apresentado resultados positivos. Foram verificadas algumas vantagens deste processo quando comparado ao processo MIG pulsado com corrente contínua positiva CC^+ para soldagem de chapas finas, especialmente de alumínio.

Os estudos relativos ao processo MIG CA desenvolvidos neste trabalho foram inicialmente voltados à soldagem de chapas finas de alumínio, seguindo a tendência mundial de aplicação deste processo. Foram desenvolvidos diversos estudos exploratórios para operacionalização da soldagem MIG CA do alumínio, que envolveram desde o desenvolvimento da fonte de soldagem à identificação de parâmetros e variáveis de soldagem, adequados ao processo.

Nos ensaios exploratórios buscou-se utilizar condições com baixos níveis de corrente, que resultaram em extinção do arco após a mudança de polaridade. Para elevados níveis de corrente o problema não foi verificado. Visando adequar o equipamento às condições de baixos níveis de corrente foram conduzidos estudos pela equipe do Labsolda da UFSC e aprimorada a fonte de soldagem, além de criar outros recursos tecnológicos para assegurar a reignição do arco.

Durante a realização dos ensaios exploratórios foi verificada grande dificuldade decorrente da instabilidade do processo e em especial do comprimento do arco, esboçando a importância do comprimento de arco para as condições de soldagem. A falta de um sistema eficaz para controlar o comprimento do arco, nos equipamentos utilizados neste trabalho, resultava em dificuldades para operacionalização não apenas do MIG CA, mas do MIG pulsado CC^+ , considerado um caso mais simples. O problema levou ao desenvolvimento de um sistema de controle, que se revelou uma importante oportunidade de desenvolvimento tecnológico.

Com o objetivo de operacionalização do MIG CA, e do MIG pulsado, buscou-se identificar formas de monitoração e controle do comprimento do arco, em especial para o alumínio, considerado o caso mais crítico. A monitoração do comprimento do arco pode ser realizada por diversas técnicas, tais como a monitoração da tensão e corrente e o uso de sensores óticos. Visando a simplificação do sistema de monitoração e controle do comprimento de arco, é conveniente o uso de metodologias baseadas nas leituras de tensão e corrente do arco, que são de fácil monitoração.

O controle do comprimento do arco pode ser efetuado por diversas técnicas, como o controle proporcional, ou o PID (proporcional, integral, derivativo), e para promover o ajuste do comprimento do arco, pode-se atuar sobre diferentes variáveis de soldagem, tais como a amplitude de corrente, a frequência, ou mesmo a velocidade de alimentação do arame.

Nos ensaios exploratórios foram avaliadas algumas opções para o controle do comprimento de arco e apesar da modulação da frequência ser uma técnica comumente referenciada nas publicações sobre este tema, a análise e os ensaios indicaram algumas vantagens em efetuar o controle pela modulação da amplitude de corrente, sendo esta última avaliada no trabalho.

Foi verificado nos ensaios exploratórios, e no trabalho apresentado por Modenesi (1994), que o comprimento do arco influencia o processo desde a abertura, e é condicionado pelo próprio processo de abertura utilizado. Durante a soldagem, quando da ocorrência de extinção do arco, constatou-se que a nova abertura do arco, utilizando elevados níveis de corrente, resulta frequentemente em perfuração de chapas finas. Visando adequar o processo de abertura do arco, às condições de soldagem MIG CA de chapas finas de alumínio, de forma a obter repetibilidade e controle da abertura do arco, foi proposto desenvolver uma nova técnica de abertura do arco sem uso de elevados níveis de corrente e que assegurasse imediatamente após a abertura, um comprimento de arco adequado.

Como o processo MIG CA é similar ao MIG pulsado, e que as técnicas de controle podem ser adaptadas de um para o outro, alguns estudos foram desenvolvidos inicialmente em MIG pulsado com alumínio, visando a simplificação do estudo para posterior ampliação e validação para o MIG CA.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, com base nos conhecimentos adquiridos sobre o MIG CA, foi identificada uma possibilidade de aplicação inédita do processo à soldagem de aço, envolvendo os casos de recuperação de dutos e vasos em operação, relacionados à indústria de petróleo. Esta possibilidade de aplicação despertou o interesse comercial, dando origem a projetos de pesquisa voltados inicialmente à aplicação do MIG CA para a recuperação de dutos em operação.

Nas indústrias de processo contínuo e em especial indústrias de petróleo, a recuperação por soldagem de dutos e vasos que apresentam corrosão localizada, apenas é realizada sem interrupção do processo produtivo, em vasos ou dutos com espessura remanescente geralmente superior a 5 mm, devido ao risco de perfuração. Entretanto, como o processo MIG CA permite reduzir o aquecimento e a penetração de forma controlada, este limite pode ser também reduzido, constituindo-se o processo MIG CA em uma alternativa importante para casos críticos destas indústrias.

A nova perspectiva de aplicação do processo MIG CA levou a que as pesquisas em desenvolvimento, fossem estendidas aos conhecimentos para o aço. Esta ampliação exigiu novos estudos e desenvolvimentos do processo MIG CA para o aço, cujas referências bibliográficas são escassas. Apesar de impor um desafio aos estudos, a oportunidade de adequação do processo MIG CA ao segmento de indústrias de processo contínuo e em especial de petróleo, talvez seja a maior contribuição deste trabalho para o desenvolvimento desta tecnologia, com perspectivas comercialmente atrativas.

Para estabelecer condições para avaliação da aplicabilidade do processo MIG CA ao aço no reparo de dutos em operação, foram identificados os parâmetros e variáveis aplicáveis, e avaliados os efeitos sobre a penetração e características térmicas decorrentes deste processo de soldagem. Foram realizados adicionalmente alguns ensaios complementares para simular o recobrimento de dutos em operação.

Diante das necessidades apresentadas, este trabalho foi conduzido com os seguintes objetivos:

Objetivo Geral:

Desenvolver a tecnologia de soldagem MIG CA, e criar soluções tecnológicas para operacionalização do processo para o alumínio e para o aço, oferecendo uma alternativa tecnológica para demandas industriais com severas restrições ao aquecimento e penetração.

Objetivos específicos:

- Aprimorar a tecnologia das fontes de soldagem para as condições do MIG CA.
- Desenvolver uma metodologia para monitoração do comprimento de arco baseado na leitura de tensão.
- Desenvolver um sistema de controle do comprimento de arco baseado na leitura de tensão atuando na modulação da amplitude de corrente de base.
- Desenvolver uma técnica de abertura do arco que assegure um comprimento de arco adequado imediatamente após a abertura e que demande baixos níveis de energia.
- Estruturar as formas de onda de corrente que permitam a operacionalização do MIG CA para o alumínio e para o aço.
- Identificar variáveis operacionais do MIG CA para o alumínio e para o aço.
- Avaliar a aplicabilidade do MIG CA para a recuperação de dutos em operação.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Fundamentos da soldagem MIG CA

As pesquisas publicadas sobre o processo MIG CA apresentam características que sugerem a viabilidade de aplicação para algumas condições onde a penetração excessiva constitui-se em fator limitante do processo de soldagem, como sugerido por Talkington (1998). Dentre as vantagens do uso deste processo Harris (2001) cita a possibilidade de controlar a penetração mediante a variação do balanço entre polaridade positiva e negativa e a capacidade de soldar juntas com frestas de até duas vezes a espessura das chapas. A redução da penetração decorrente do aumento do percentual de tempo em polaridade negativa, no processo MIG CA, também foi verificada por Farias et al (2005). As aplicações sugeridas não se prendem apenas à soldagem, conforme verificado por Joseph et al (2001) o processo MIG CA aplicado à brazagem de chapas galvanizadas resultou em menor distorção das chapas que o processo MIG pulsado. Da mesma forma que os pesquisadores citados, Mulligan (2003) em sua análise comparativa entre os processos MIG CC⁺ e MIG CA, verificou que o processo MIG CA apresenta menor sensibilidade quanto ao afastamento e que quanto maior o percentual de tempo em polaridade negativa menor a penetração e maior a taxa de fusão do arame. As publicações caracterizaram o processo MIG CA como favorável para condições de soldagem de chapas finas e de forma natural estimularam várias pesquisas para estas aplicações.

Tendo em vista o potencial de aplicação do processo MIG CA para condições com significativas restrições ao aquecimento, foram conduzidas pesquisas bibliográficas enfocando os fatores relacionados ao controle da penetração, à taxa de fusão do arame e estabilidade do processo, de forma a subsidiar o desenvolvimento tecnológico voltado à operacionalização do MIG CA.

Dentre os fatores que influenciam a penetração na soldagem MIG, a transferência metálica, é apontada por Essers e Walter (1979) como fator determinante. Segundo estes, as gotas metálicas são geralmente transferidas em uma condição de tal superaquecimento, que o calor contido nas gotas seria quase suficiente para fundir toda a área da solda, embora seja ainda apenas 30% do calor total recebido pelo metal de base. Um dos fatores que afeta o significativamente a temperatura das gotas, conforme Nemchinsky (1998), é o efeito periódico de remoção do fundido da extremidade do arame-eletrodo. Conforme este, para frequências baixas a temperatura das gotas é mais alta, e para frequências mais altas a temperatura fica próxima à temperatura de fusão.

Considerando que o uso de maiores frequências aumentaria a remoção periódica das gotas, e conseqüentemente resultaria em redução da temperatura das mesmas, seria esperada uma redução da penetração devido à redução do calor transferido à peça. De fato, considerando o processo MIG pulsado, Nemchinsky (1998) relata que dentro das condições de destacamento de uma gota por pulso, o uso de frequências mais altas resulta em maior taxa de fusão, com menor temperatura de gotas, menor aquecimento na solda, e maior estabilidade. Entretanto, Essers e Walter (1979) identificaram, em experimentos, com processo Plasma-MIG, que para frequências altas, as gotas atingem a depressão criada pelo impacto da anterior na poça de fusão, aumentando assim a profundidade de penetração. Em baixas frequências, a depressão formada pelo impacto da gota anterior se desfaz devido ao longo intervalo de tempo entre os impactos, resultando em uma penetração menor. Essers e Walter (1979) identificaram que a penetração está relacionada com o produto da quantidade de movimento das gotas pela frequência destas, conforme Figura 2.1, embora Rodrigues (2007) tenha identificado que a quantidade de movimento efetiva influencie a penetração de forma menos marcante que a corrente e o comprimento do arco.

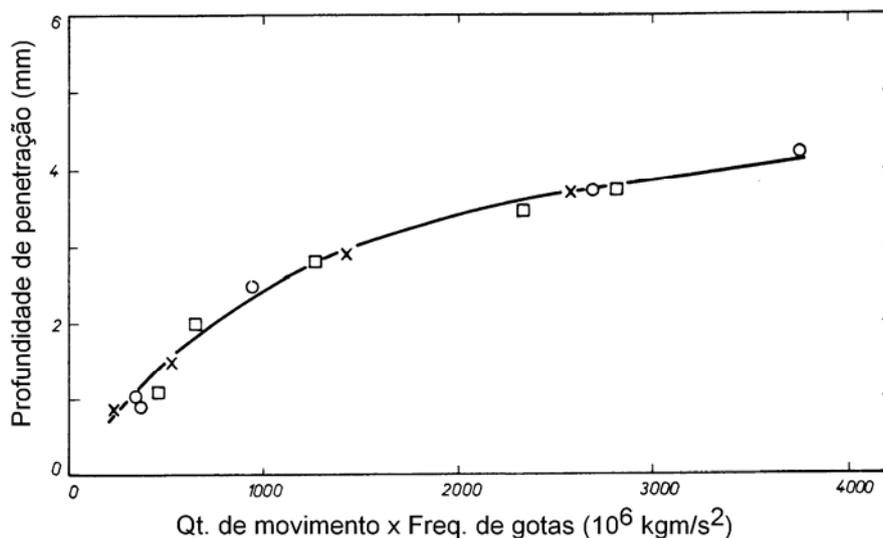


Figura 2.1 - Relação entre Profundidade de penetração e Produto da quantidade de movimento pela frequência de gotas, conforme Essers e Walter (1979)

Considerando outros aspectos envolvidos no aquecimento da gota e na fusão do arame-eletrodo, Nemchinsky (1998) cita que a extremidade fundida do eletrodo (gota) é aquecida externamente pelo arco plasma e o calor é transferido para o interior da gota por convecção e a parte sólida do eletrodo é aquecida pelo fluxo de calor oriundo da extremidade fundida e pelo aquecimento por efeito joule. Estes são os processos dominantes no aquecimento do eletrodo e determinantes da taxa de fusão, conforme Waszink e Van Den

Heuvel (1982). As equações representativas da taxa de fusão na polaridade negativa, determinadas por Nascimento et al (2007), indicam que em polaridade negativa a componente representativa do efeito joule é menor, provavelmente pelo fato da escalada do arco reduzir significativamente a extensão do eletrodo que está sujeita a este mecanismo de aquecimento, prevalecendo neste caso o aquecimento na região catódica que se estende à parte sólida do arame-eletrodo.

No aquecimento da gota, conforme Nemchinsky (1997), o coeficiente de condução térmica é expresso como uma função da viscosidade e da tensão superficial, e esta, conforme Subramanian et al (1998), é influenciada por fatores como o gás de proteção utilizado e a presença de elementos ativos no metal fundido. Isto sugere que sejam conduzidos estudos específicos para uma adequada avaliação do efeito dos principais gases de proteção no processo MIG CA. Além das implicações quanto à mudança de tensão superficial, provocada pelo gás de proteção, devem ser consideradas as diferenças na convergência ou divergência das linhas de corrente junto ao anodo, que, conforme Nemchinsky (1996) e Jones et al (1998), podem favorecer o destacamento da gota ou mesmo empurrá-la contra o eletrodo, conforme Figura 2.2. Jones et al (1998) destacam que a luminosidade observada sobre a gota é mais um indicativo da temperatura e composição que indicativo do fluxo de corrente.

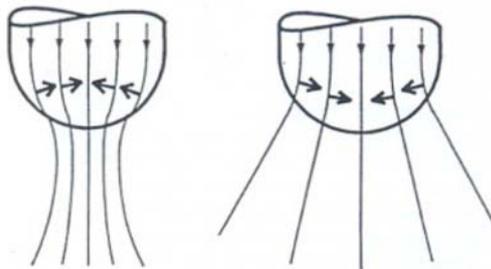


Figura 2.2 - Representação das linhas de densidade de corrente, apresentada por Nemchinsky (1996)

Outro aspecto verificado por Essers e Walter (1979) como condicionante da profundidade de penetração, é o diâmetro do arame, sendo que arame de menor diâmetro resulta em maior velocidade das gotas, provocando maior penetração. Este fato é justificado pela maior densidade de corrente, e conseqüente aumentando as forças eletromagnéticas causadoras do efeito pinch. Este efeito pode ser percebido na Figura 2.3, comparando-se, para uma mesma corrente, a penetração resultante de diâmetros de 1,2 e 1,6, ambos em polaridade positiva CC^+ .

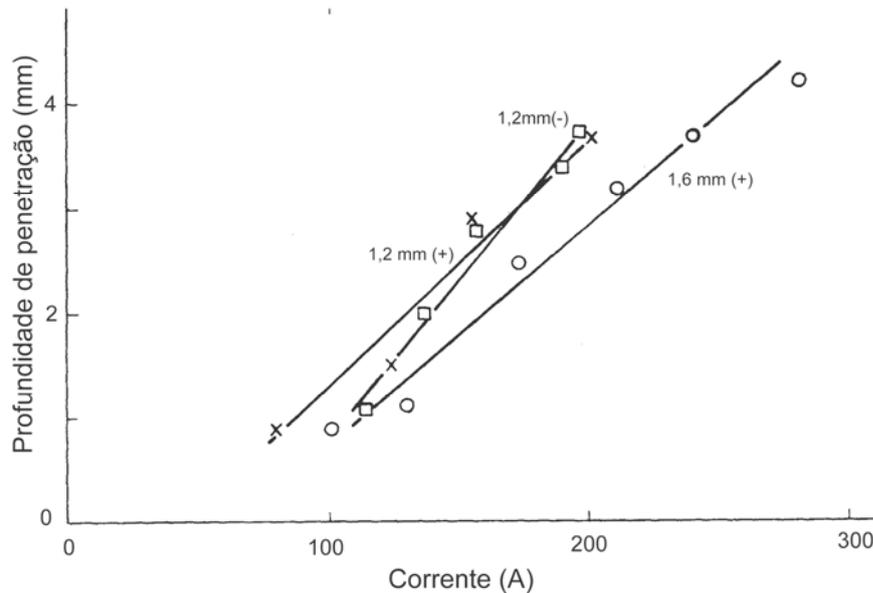


Figura 2.3 - Influência do diâmetro do eletrodo e da polaridade na penetração, apresentada por Essers e Walter (1979)

Outro fator determinante da penetração é a polaridade usada, no entanto as justificativas apresentadas devem ser analisadas criticamente quando considerado o processo MIG CA. Conforme Essers e Walter (1979) a polaridade negativa resulta em menor velocidade das gotas, provocando menor penetração, o que é explicado pelo fato da mancha catódica estar acima da gota em formação, fazendo com que o fluxo de corrente não passe pela gota fundida, reduzindo o efeito pinch. Com base nesta justificativa é aceitável que seja utilizado o intervalo de pulso positivo no MIG CA para favorecer o destacamento de gota por efeito pinch, entretanto, como o destacamento não ocorre na polaridade negativa esta justificativa para redução da penetração não é aceitável para o processo MIG CA.

Conforme Hiltunen e Pietikäinen (1979) o uso da polaridade negativa, comparada à outra polaridade, resulta em maior taxa de fusão do arame, devido a uma maior eficiência na transferência de calor do arco para o arame. Este aumento de eficiência é justificado pela maior agitação do metal fundido, decorrente de uma elevada intensidade de corrente, causada pelo fato da mancha catódica apresentar uma menor área, quando comparada à área da mancha anódica que o arame apresentaria se estivesse em polaridade positiva. Embora estas considerações sejam relevantes, conforme apresentado por Tong et al (2001), e Souza et al (2007), o fato de haver um salto, ou escalada, da mancha catódica para a parte sólida do arame-eletrodo, faz com que haja uma maior exposição da gota ao arco voltaico, fazendo com que o calor seja usado eficientemente para fundir o arame-eletrodo.

O envolvimento da extremidade do arame-eletrodo, quando em polaridade negativa, conforme Lancaster (1979), é resultado da mobilidade da mancha catódica provocada pela limpeza catódica ocorrida na extremidade do arame-eletrodo quando em polaridade negativa,

fazendo com que o arco escale para a parte sólida do arame-eletrodo onde a camada de óxido ainda não foi removida, conforme Figura 2.4.

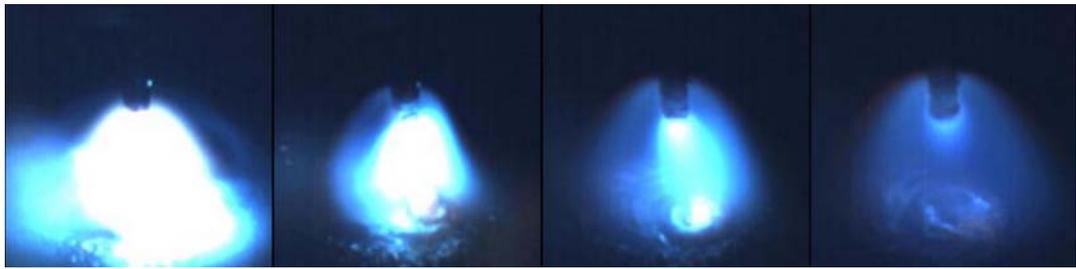


Figura 2.4 - Escalada do Arco Voltaico no MIG CA durante fase negativa

A justificativa apresentada por Tong et al (2001) para a maior taxa de fusão na polaridade negativa, é coerente com os resultados de Kiyohara et al (1979), que utilizando polaridade positiva, observou que em condições de menor tensão no arco, ocorre um aumento da área anódica, com maior exposição da gota ao arco, Figura 2.5, resultando em um aumento de eficiência na transferência de calor para a gota, e conseqüentemente provocando o aumento na taxa de fusão.

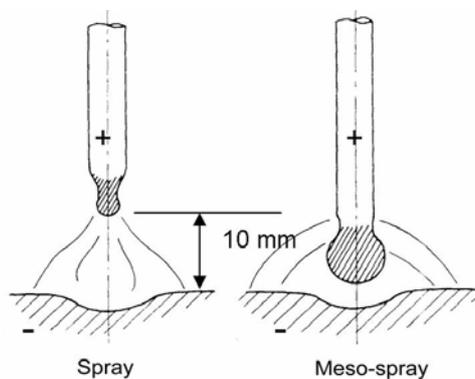


Figura 2.5 - Influência do comprimento do arco na exposição da gota (A5183, ϕ 1,6mm, Corrente > 150 A), conforme Kiyohara et al (1979)

Alguns trabalhos publicados fazem referência à influência da tensão do arco sobre a taxa de fusão do arame. Embora Halmoy (1979) defenda que a tensão do arco não influencie a taxa de fusão do arame, o trabalho de Kiyohara et al (1979), mostra que a tensão do arco está relacionada à taxa de fusão do arame, conforme Figura 2.6.

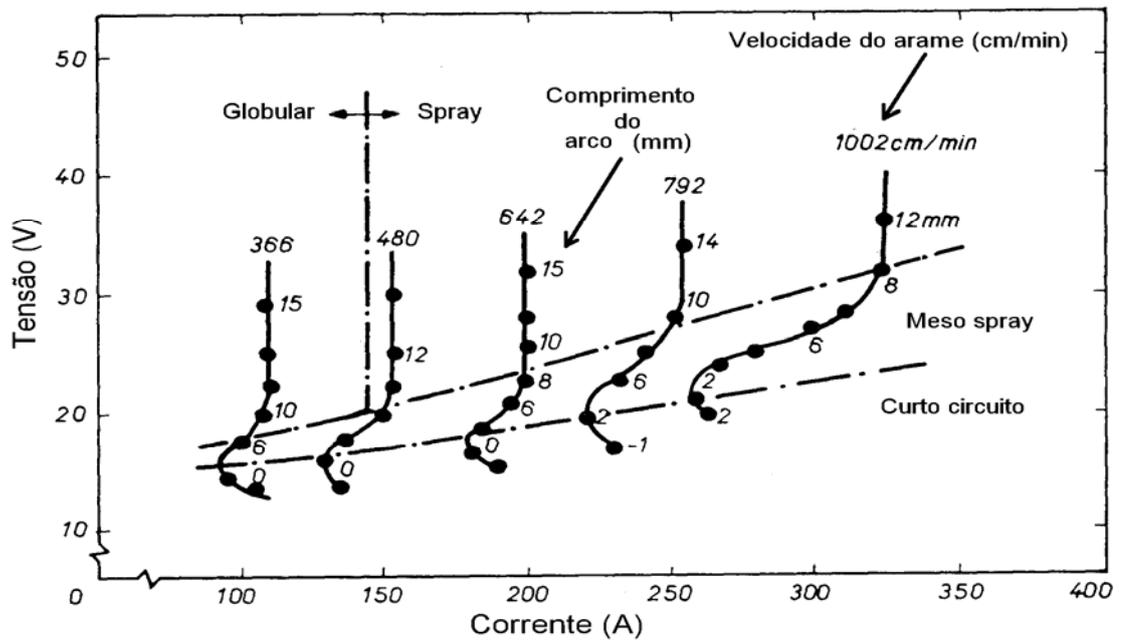


Figura 2.6 - Comportamento do arco MIG do alumínio (Material: A5183 com 1,6 mm de diâmetro, gás Argônio), conforme Kiyohara et al (1979)

Estudos similares ao apresentado anteriormente, foram desenvolvidos no laboratório de soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina (Labsolda – UFSC) por Locatelli e Silva (2006), para determinação de curvas de igual consumo, utilizando fonte de tensão constante. Os resultados indicam que para o alumínio, acima de uma determinada tensão (18 V), o comportamento é similar ao identificado por Kiyohara et al (1979). Abaixo desta tensão, na região próxima à corrente de transição (140 a 160 A), foi verificado um comportamento não uniforme, conforme Figura 2.7.

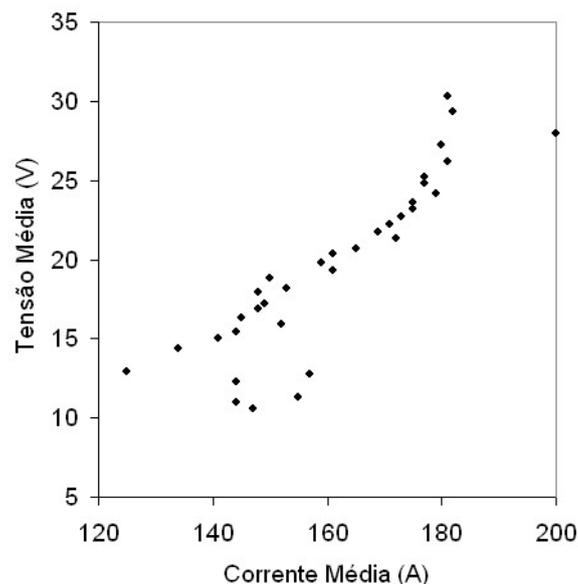


Figura 2.7 - Curva de igual consumo, alumínio, arame ER 4043 de 1,2 mm de diâmetro, velocidade de arame de 7 m/min e gás de proteção Argônio 15 l/min, conforme Locatelli e Silva (2005).

Outros estudos desenvolvidos no Labsolda – UFSC foram realizados utilizando o processo MIG em modo misto, que é similar ao MIG pulsado, porém, durante o intervalo de pulso, a fonte opera como uma fonte de tensão, e durante o intervalo de base, opera como uma fonte de corrente. Esta opção permitiu a realização de ensaios de igual consumo, com transferência sem curto-circuito, e possibilidade de ajuste da tensão média mediante a variação da tensão de pulso. Os resultados indicam uma significativa mudança de comportamento para tensões mais baixas, conforme Figura 2.8, o que também condiz com os resultados de Kiyohara et al (1979).

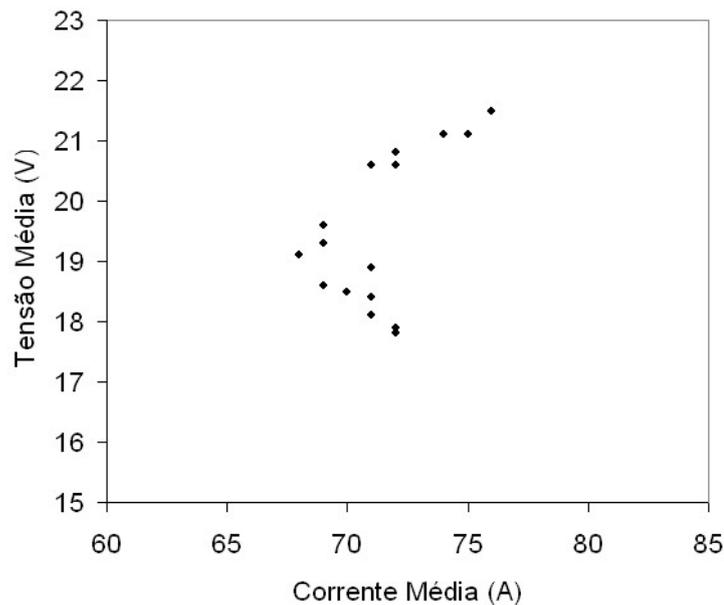


Figura 2.8 - Curva de igual consumo, alumínio, arame ER 4043 de 1,2 mm de diâmetro, velocidade de arame de 3,2 m/min e gás de proteção Argônio 15 l/min, conforme Locatelli e Silva (2005)

Os resultados dos estudos desenvolvidos no Labsolda – UFSC e os apresentados por Kiyohara et al (1979), sugerem que para o alumínio, existam três faixas com comportamentos distintos. A primeira, acima de um comprimento de arco correspondente a uma tensão de 25 V onde a variação do comprimento do arco não provoca significativa variação da taxa de fusão, ou seja, não se pode esperar que nesta faixa ocorra um equilíbrio automático do comprimento do arco. A segunda, intermediária, de 19 a 25 V, onde o aumento da tensão corresponde a um aumento da corrente, sugerindo que se pode esperar um auto-controle do comprimento do arco nesta faixa. A terceira faixa, com tensões abaixo de 19 V, apresenta um comportamento instável, sendo que desvios do ponto de equilíbrio podem promover ou a redução da taxa de fusão e conseqüente curto circuito, ou o aumento da taxa de fusão até que seja atingida a segunda faixa, esta com tensões superiores a 19 V. Considerando estes resultados, que indicam que a taxa de fusão do arame, para o alumínio, pode variar significativamente conforme o comprimento do arco, a estruturação de um sistema de controle

de comprimento do arco pode ser uma tarefa complexa, uma vez que a dinâmica de resposta do sistema deve ser diferente para cada uma faixa do comprimento do arco.

As curvas de igual consumo para o aço não apresentam o mesmo comportamento que o igual consumo verificado no alumínio. Para o aço, Quites e Dutra (1979) utilizando fonte de tensão constante, identificaram o comportamento apresentado na Figura 2.9. Outros estudos desenvolvidos no Labsolda –UFSC, voltados ao processo MIG pulsado, utilizando o modo misto com corrente alternada, ou seja, aplicando um pulso de tensão durante o intervalo com polaridade positiva e uma corrente de base durante o intervalo com polaridade negativa, apresentou comportamento similar ao verificado no modo convencional, conforme Figura 2.10, sugerindo que para a soldagem MIG CA do aço, se pode esperar um auto-controle do comprimento do arco, uma vez que maiores tensões demandam maiores correntes.

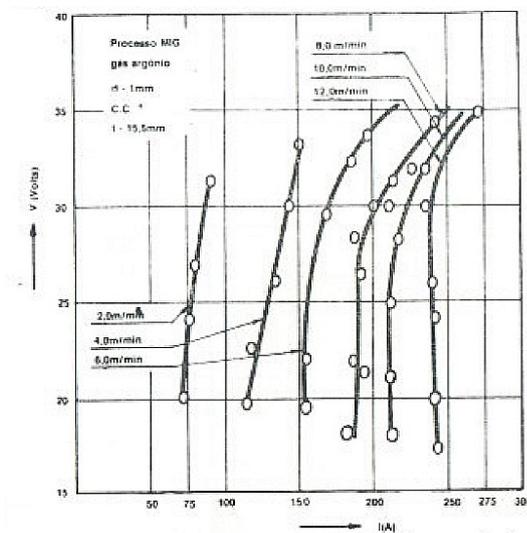


Figura 2.9 - Curva de igual consumo, aço E 70 S3, arame de 1,0 mm de diâmetro, velocidade de arame de 2 a 12 m/min e gás de proteção Argônio 15 l/min, apresentada por Quites e Dutra (1979)

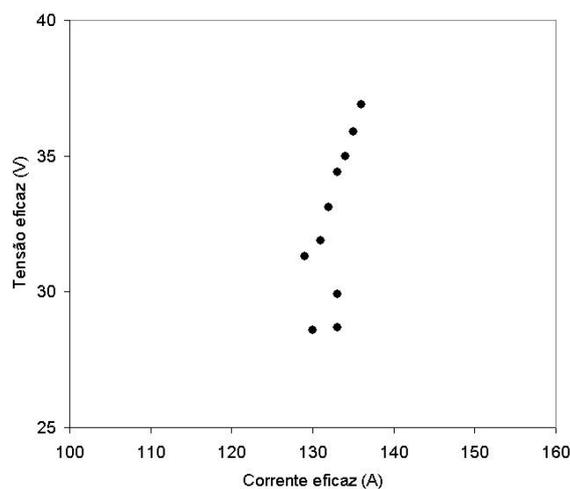


Figura 2.10 - Curva de igual consumo, aço, arame ER-70 S6 de 1,2 mm de diâmetro, gás de proteção Argônio com 8% CO₂, 15 l/min, velocidade do arame de 3 m/min, conforme Locatelli e Silva (2005)

Os aspectos relativos ao comportamento da taxa de fusão, expressa pela velocidade de alimentação do arame, conforme Nemchinsky (1998), esta não se comporta linearmente em relação ao comprimento do eletrodo, conforme Figura 2.11. Desta forma, para um processo com distância bico peça constante, em que a variação do comprimento do arco condiciona uma variação do comprimento do eletrodo, deve ocorrer uma variação não linear da taxa de fusão. Isto posto, é esperada uma maior complexidade para controlar o comprimento de arco uma vez que a taxa de fusão não tem comportamento linear em relação ao comprimento do arame-eletrodo.

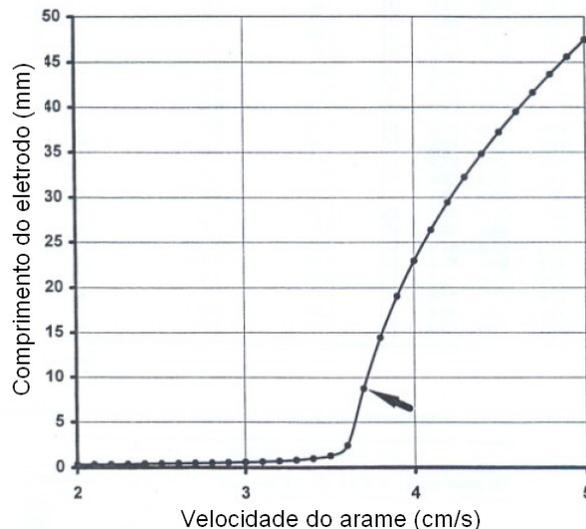


Figura 2.11 - Relação entre o comprimento do eletrodo e a velocidade do arame para o aço, apresentada por Nemchinsky (1998)

Quanto à influência do comprimento do arco, além dos aspectos relacionados à variação da taxa de fusão e da própria estabilidade do arco, os resultados apresentados por Rodrigues (2007) indicam que o comprimento do arco tem significativa influência na penetração, tendo sido verificada a redução da penetração com o aumento do comprimento do arco. Rodrigues (2007) identificou também, que o efeito de penetração esbelta, tipo “*Finger Like*”, ao centro da zona fundida é mais acentuado com correntes elevadas e arcos curtos.

Além da influência da polaridade negativa na taxa de fusão do arame citada anteriormente, Guile (1979) e Lancaster (1979) destacam que no processo de transferência metálica a gota é repelida assimetricamente pelo arco, sendo freqüentemente projetada para cima ou para os lados, conforme Figura 2.12. Este comportamento sugere que seja evitada a transferência durante a fase com polaridade negativa, motivo pelo qual no processo MIG CA é utilizado o pulso de corrente durante o intervalo com polaridade positiva, para promover o destacamento da gota.

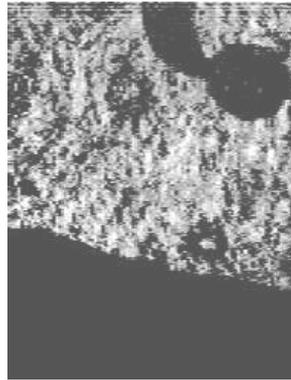


Figura 2.12 - Gota repelida devido à polaridade negativa, apresentado por Nascimento et al (2007)

A componente radial das forças magnéticas é a maior força para promover o destacamento de gotas, conforme verificado por Haidar (1998) em estudos do processo MIG, utilizando Argônio como gás de proteção. Conforme o tipo de corrente usada, se constante ou pulsada, há uma diferença entre as forças magnéticas envolvidas no destacamento de gotas, conforme verificado por Jones et al (1998), tendo sido verificado que as forças são mais efetivas quando usada corrente pulsada. Jones et al (1998) apresentam como hipótese para explicar esta diferença, o fato de que com corrente constante forma-se um fluxo interno do fluido que anula a componente rotacional das forças magnéticas, parte das quais é na direção de destacamento, enquanto que, ao ser aplicado um pulso de corrente não há tempo para desenvolver o fluxo e assim as forças magnéticas são mais efetivas. Neste sentido, é esperado que pulsos de corrente com subida instantânea, sem rampa suave, sejam mais favoráveis ao destacamento de gotas, embora o uso de rampas suaves possa ter uma significativa contribuição para a redução do ruído acústico e seja utilizada em alguns equipamentos comerciais.

Geralmente o processo de destacamento de gotas é analisado isoladamente, sendo consideradas as condições durante o pulso de corrente. Neste sentido, Bálsamo (1999) defende que na maioria das condições, baixas correntes de base têm pouco efeito no desempenho da transferência metálica o que é reforçado pelas conclusões de Vilarinho (2001), o qual verifica que as variáveis de base não influenciam no destacamento de gota. Apesar destas considerações quanto à influência das variáveis de base sobre o destacamento, este aspecto foi questionado para o processo MIG CA, pois, conforme Simpson (1995), a condição inicial pode afetar de forma complexa a formação da gota, o que é também identificado por Haidar e Lowke (1996), que destacam a importância do comprimento fundido do eletrodo na condição inicial de formação da gota. Considerando que na soldagem MIG CA, a formação da gota é diferenciada do processo MIG pulsado, devido ao envolvimento de uma maior extensão do arame-eletrodo pelo arco durante a fase com polaridade negativa, a

influência das fases de base positiva e negativa sobre o destacamento de gota poderiam comprometer o destacamento. Nos ensaios realizados no Labsolda –UFSC as variáveis de pulso do MIG pulsado se mostraram adequadas às condições operacionais utilizadas para o MIG CA, tanto para o alumínio como para o aço, indicando, a princípio, que mesmo para o MIG CA as variáveis de base não influenciam no destacamento de gota.

Diante da viabilidade de uso da polaridade negativa para reduzir a penetração e a necessidade de uso da polaridade positiva para promover o destacamento de gota, o uso da corrente alternada se apresenta como uma alternativa para associar os benefícios das duas polaridades. Para operacionalizar a soldagem MIG pulsada com corrente alternada, MIG-CA, devem ser considerados também os problemas inerentes à mudança da polaridade, que provocam a extinção do arco durante esta mudança.

Um dos fatores fundamentais para promover a reignição do arco, conforme Schellhase e Weinschenk (1979), é a vaporização de gotas fundidas, e a presença de vapores metálicos de alumínio no arco, promovem o aumento da condutividade elétrica do arco, sendo a principal fonte de elétrons livres para a condução da corrente em baixas temperaturas, conforme Glickstein (1979). Neste contexto a proposição de técnicas como o MIG CA, que resultam na redução da temperatura das gotas, indicam que o efeito benéfico da alta temperatura da gota para a formação de vapores, pode ser inibido, sendo esperada maior dificuldade para a reignição do arco, o que deve ser suprido por recursos da fonte de soldagem. Para promover a reignição do arco durante a mudança de polaridade Gohr Jr. (2002), apresenta como solução, a aplicação de um pulso de alta tensão durante um período da ordem de micro segundos. Esta proposta tecnológica foi implementada e aprimorada nas fontes de soldagem utilizadas no presente trabalho.

A evolução contínua do processo MIG CA favoreceu a evolução contínua dos equipamentos, sendo identificadas nestes diferentes técnicas para a operacionalização do processo. Fundamentalmente o que se verifica quanto à tecnologia dos equipamentos utilizados nas pesquisas publicadas sobre o MIG CA, são variações na configuração do ciclo de corrente. A associação das possíveis combinações dos intervalos de corrente, positiva e negativa, fornece um amplo conjunto de opções de formas de onda de corrente aplicáveis ao processo MIG-CA, o que torna o processo complexo quanto à determinação das variáveis e a previsão dos resultados.

Entre as formas de onda de corrente para o processo MIG-CA, o modelo típico é a forma apresentada na Figura 2.13, onde a seqüência é composta por um pulso positivo, uma base negativa e uma base positiva.

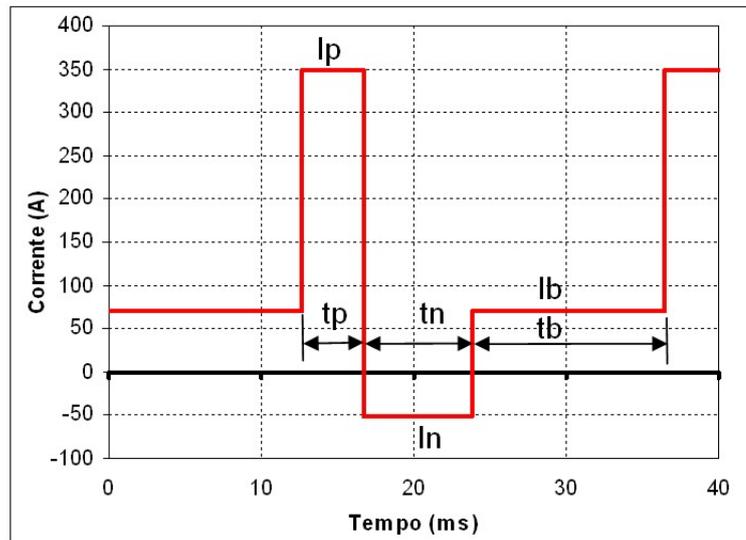


Figura 2.13 - Modelo típico de forma de onda do MIG CA, apresentado por Gohr (2002)

Onde: I_p : Corrente na fase de pulso, t_p : tempo de pulso;

I_n : Corrente na fase negativa, t_n : tempo na fase negativa;

I_b : Corrente na fase de base positiva, t_b : tempo na fase de base positiva.

Como variação da forma de onda apresentada anteriormente, tem-se a mesma seqüência de intervalos, porém com rampas de subida e descida mais suaves, no intervalo do pulso, constituindo-se em um pulso trapezoidal de corrente Figura 2.14.

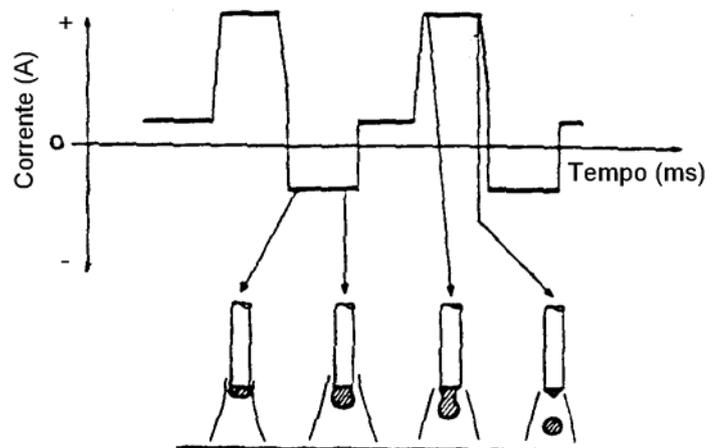


Figura 2.14 - Onda MIG CA com pulso trapezoidal, conforme SENSARC (1992)

Dentre as inúmeras variações possíveis para a forma da corrente, Böhme et al (2002) apresentam ensaios em alumínio com três tipos de forma de onda da corrente alternada, utilizando sempre um pulso de corrente triangular para promover o destacamento de gota, conforme Figura 2.15.

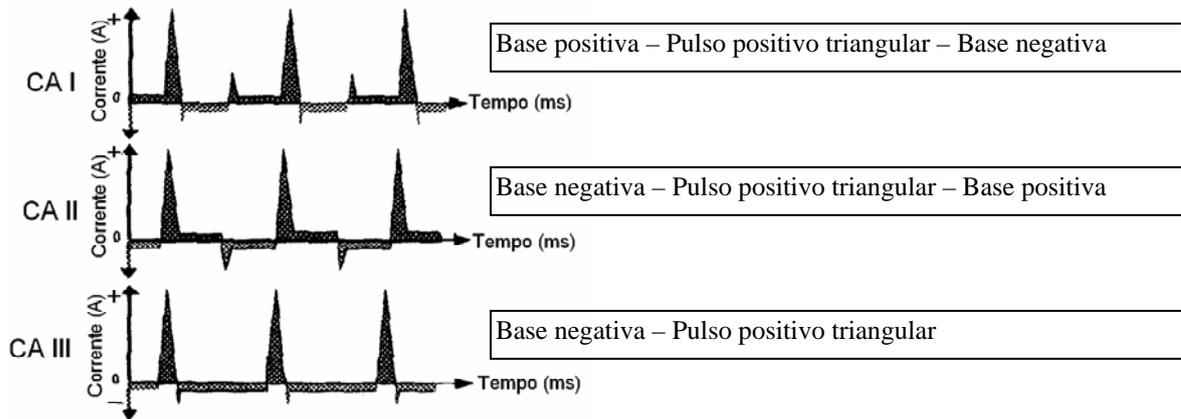


Figura 2.15 - Variações de onda de corrente com pulso triangular estudadas por Böhme et al (2002)

As conclusões apresentadas por Böhme et al (2002) reafirmam a adequação do processo MIG CA à soldagem de chapas finas de alumínio. Os resultados indicam que a forma de onda “CA I”, que é similar às formas de onda de corrente verificadas nos equipamentos utilizados para o MIG CA, coerentes com as figuras 2.13 e 2.14, apresentou boa estabilidade. A forma de onda “CA II” apresentou bons resultados, tendo a tendência de menor formação de vapores metálicos. A forma de onda “CA III” não permitiu a limpeza catódica necessária ao alumínio. Esta conclusão, que indica a necessidade de uso do intervalo de base positiva para promover a limpeza catódica, não pode ser estendida para outros materiais, como o aço, sem um estudo específico, embora o uso desta base positiva seja verificado na maioria dos equipamentos comerciais, independentemente do tipo de material a ser soldado.

Uma das formas de onda mais comumente verificada em publicações relativas ao processo MIG CA, apresenta características que sugerem aplicação específica para o alumínio, como a forma de onda utilizada nas pesquisas desenvolvidas por Tong et al (2001) e Tong e Ueyama (2001), apresentada na Figura 2.16. Esta forma de onda é caracterizada pela utilização de uma base positiva de curta duração, aproximadamente 1,5 ms, após o intervalo de pulso, o que é justificado como sendo um mecanismo para evitar formação de respingos finos.

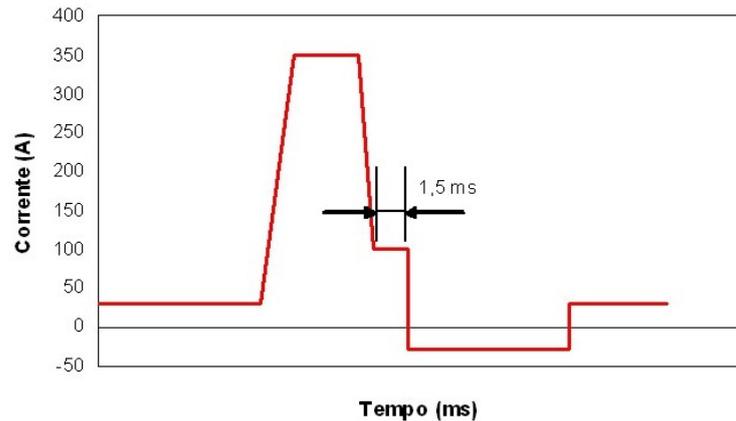


Figura 2.16 – Forma de onda com base positiva após o pulso, apresentada por Tong et al (2001)

A formação dos respingos finos, apresentada por Tong et al (2001), é decorrente da repulsão de gotículas. Conforme seqüência de imagens apresentada por Tong et al (2001), após o destacamento da gota, devido ao acentuado alongamento e estrição do arame-eletrodo, forma-se a partir desta extremidade alongada, uma gotícula. Quando ocorre a mudança de polaridade antes que esta gotícula tenha completado a trajetória de queda, a ação das forças repulsivas desvia esta gotícula, gerando os respingos finos. O intervalo com polaridade positiva de 1,5 ms após o pulso, sugerida por Tong e Ueyama (2001) permite que a gotícula conclua sua trajetória durante o intervalo com polaridade positiva, livre da ação das forças repulsiva. O acentuado alongamento da extremidade do arame durante a estrição para destacamento da gota, é característico do alumínio, e pode ser identificado pela significativa alteração da tensão e da intensidade luminosa no arco, porém Wang (1997) verificou que o aço não apresenta esta característica. Desta forma, pode-se prever menor tendência à formação das gotículas para o aço e, desta forma, o uso da base positiva após o pulso, como forma de evitar a formação de respingos finos, pode não ser necessária para esta aplicação.

No processo de transferência metálica, Talkington (1998), assim como Nascimento et al (2007), utilizando condições similares, com amplitude de corrente da ordem de 200 A durante a fase negativa, e gás de proteção Ar com 2% de O₂, constataram o fenômeno de forte repulsão das gotas quando em polaridade negativa. Nascimento et al (2007), utilizando filmagens de alta velocidade, identificaram que, quando há mudança da polaridade positiva para a negativa imediatamente após o pulso de corrente, ocorre forte repulsão das gotas pelo fato das gotas atravessarem o arco sob ação das forças repulsivas que ocorrem na polaridade negativa. Deve-se considerar que além de haver repulsão das gotas já destacadas, o próprio destacamento da gota pode ser comprometido. Conforme Choi et al (1998), o destacamento de gota pode ocorrer após o pulso, justificando esta defasagem como um tempo requerido para

desenvolver um fluxo axial com força inercial suficientemente elevada. Para evitar os problemas de repulsão verificados, Talkington (1998) sugere o uso de amplitudes independentes e de controle da indutância como forma de limitar o efeito das forças repulsivas. De outra forma, Nascimento et al (2007) verificaram que a repulsão das gotas pode ser evitada com o uso de um intervalo de base positiva após o pulso, antes da fase negativa, ou seja usando o mesmo recurso proposto por Tong e Ueyama (2001), porém com o objetivo de evitar a repulsão da gota e não de uma gotícula formada após o destacamento.

Quanto ao pulso de corrente para o destacamento de gotas, além das formas de onda, triangular, trapezoidal e retangular, apresentadas anteriormente, outra forma de onda é sugerida por Zhang (1998) e Zheng (2001), a qual é fundamentada na aplicação de uma onda coerente com a frequência de oscilação vertical da extremidade fundida do arame, aproveitando assim a inércia da gota. O efeito do estímulo à excitação da gota permite que se obtenha um destacamento de gota, com corrente inferior à corrente de transição, conforme apresentado por Wu et al (2004) Apesar de serem considerações importantes no sentido de reduzir a corrente na soldagem e otimizar o processo de destacamento de gotas, considerando o estágio, ainda inicial, de desenvolvimento do processo MIG CA, estes estudos não serão abordados neste trabalho.

Conforme verificado, existem diversas formas de onda da corrente que podem ser utilizadas para o processo MIG CA, não estando claros quais os benefícios de cada uma. Esta diversidade é consequência, em parte, da falta de adequação das fontes de soldagem a este novo processo, o que sugere pesquisas específicas para esta finalidade.

Um dos aspectos críticos a serem considerados na soldagem MIG CA é a taxa de fusão, uma vez que a mudança de polaridade impõe mudanças significativas na taxa de fusão. Embora a taxa de alimentação seja decorrente da média de consumo, a taxa de fusão do arame-eletrodo sofre variação periódica, sendo máxima quando as gotas são pequenas, diminuindo com o aumento destas, conforme verificado por Nemchinsky (1998). Estudos utilizando filmagem de alta velocidade, desenvolvidos por Harwig et al (2002) e Harwig et al (2005), identificaram que para o MIG CA, durante a fase com polaridade negativa, a taxa de fusão varia, sendo elevada nos primeiros 10 ms e menor no restante do intervalo.

O aquecimento do eletrodo e a taxa de fusão são aspectos críticos para o processo MIG e relacionados tanto à transferência metálica, como estabilidade e operacionalização da soldagem. Considerando a significativa influência do comprimento de arco na penetração, transferência metálica e estabilidade do processo, em especial para condições que apresentam restrições quanto ao aquecimento, é necessário considerar a estabilidade do comprimento do arco, sua monitoração e controle. Entre os mecanismos de controle de comprimento de arco é

comum o uso da variação da frequência para promover a variação da taxa de fusão do arame e conseqüentemente a variação do comprimento, como usado por Essers e Gompel (1984) e Santos (2000), embora possam ser utilizadas outras técnicas, como a variação da velocidade do arame ou a variação da amplitude da corrente, ou mesmo combinações destas. Para o MIG CA, foi identificado um equipamento industrial que utiliza, para controle do comprimento do arco, a variação do tempo de base positiva, em associação com a imposição de tensão no pulso, modo misto, conforme Figura 2.17, resultando na modulação da frequência e variação da corrente de pulso, ou seja, há uso simultâneo de dois sistemas de controle do comprimento do arco.

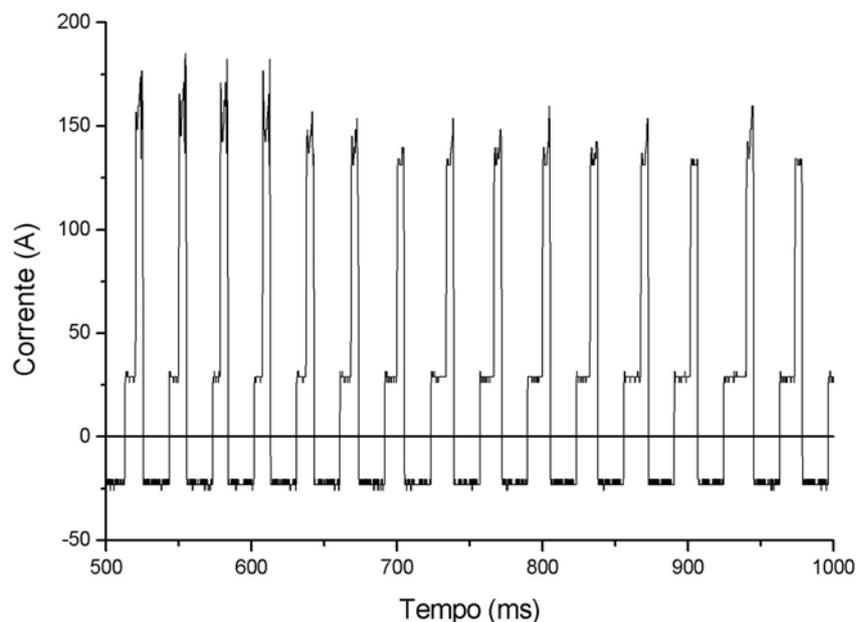


Figura 2.17 – Oscilograma de corrente, com controle atuando na modulação da frequência e da corrente de pulso, obtida em ensaio de soldagem do alumínio usando a fonte SENSARC AL3500.

Uma particularidade do sistema acima citado é que o mesmo fixa uma corrente mínima de pulso para assegurar o destacamento de uma gota por pulso. Esta imposição de corrente mínima, evita que, em condições de arco longo, a transferência metálica entre em regime globular, fenômeno observado por Santos (2000) em experimentos com corrente pulsada e imposição de tensão no pulso, modo misto.

Outro aspecto crítico para implementação de um sistema de controle de comprimento de arco eficaz é a determinação de um sistema confiável de monitoração do comprimento do arco que seja industrialmente aplicável. Os sistemas mais comuns de monitoração do comprimento do arco são baseados na monitoração da tensão do arco, porém, considerando as oscilações decorrentes do uso de uma corrente pulsada, e até mesmo com polaridade variada,

é necessário esclarecer como a tensão do arco deve ser medida. Neste sentido, para a monitoração da tensão do arco, Zhiming et al (1989), sugerem que a aquisição seja feita nos intervalos de baixa corrente, tomando como fundamento que as variações de resistência do arco, dissipação térmica e resistência no contato, pouco influenciam a precisão da medição. Apesar das justificativas apresentadas por Zhiming et al (1989), Essers e Gompel (1984), comprovaram com filmagens de alta velocidade, que a medição da tensão no intervalo com baixa corrente está sujeita a um erro significativo, devido a haver nesta condição poucos pontos de emissão de elétrons, havendo saltos destes pontos, que representam variações na medição da tensão da ordem de 2 a 3 V. Com base nisto, Essers e Gompel (1984) sugerem que a monitoração da tensão seja feita no período de pulso, onde, devido à grande quantidade de pontos de emissão de elétrons, a leitura é mais representativa do comprimento do arco. Entretanto estas conclusões também devem ser questionadas, uma vez que durante o período de pulso ocorre destacamento de gota, que induz a uma perturbação na leitura da tensão.

Em estudo voltado ao MIG pulsado, Wang (1997) verificou que a sensibilidade da tensão para monitorar o comprimento do arco é menor que a da luminosidade e avaliou a eficácia de um controlador PID, que utiliza a monitoração da luminosidade como indicativo do comprimento e atua no tempo de base para controlá-lo. Para monitorar o comprimento do arco Yoo et al (1997) também apresentam uma avaliação quanto ao uso da intensidade luminosa, sendo obtida boa correlação, entretanto sua avaliação está limitada ao regime de spray. Para aplicação da técnica ao processo MIG pulsado e MIG CA, outros aspectos relativos à monitoração por luminosidade, devem ser considerados, como a oscilação da poça de fusão, que exerce influência na intensidade luminosa durante a fase de base, imediatamente após o pulso de corrente, conforme verificado por Wohlfahrt et al (2001). Embora a monitoração por luminosidade seja uma técnica promissora, deve-se considerar que é necessário o aprimoramento desta para adequá-la ao processo MIG CA.

2.2. Fundamentos da Abertura do arco MIG

Convencionalmente a abertura do arco no processo MIG é baseada no aquecimento provocado pelo curto circuito estabelecido entre arame-eletrodo e o metal de base, porém, o alumínio por possuir uma baixa resistividade elétrica e elevada condutibilidade térmica, reduz e dissipa significativamente o calor gerado por efeito joule. Esta condição, aliada à elevada ductilidade do alumínio, dificulta a abertura, por vezes resultando em falha no processo de abertura, podendo acarretar em enrolamento do arame no mecanismo tracionador.

Modenesi (1994) identificou que após a abertura do arco MIG, conforme as condições da abertura, verifica-se instabilidade, que pode durar mais de 10 s, quando o arco é curto e

utiliza-se gases com baixo potencial de oxidação. Modenesi (1994) justifica que a instabilidade é decorrente do aumento do ângulo entre o eletrodo e a região de emissão, e com isto, há maior dificuldade de contato do arco com a região catódica. Neste sentido seria recomendável assegurar um comprimento do arco mínimo imediatamente após a abertura, de forma a evitar este intervalo de instabilidade. Entretanto o comprimento do arco imediatamente após a abertura, pelos métodos convencionais de abertura, é de certa forma aleatório. O comprimento do arco após a abertura, conforme Santos (2000), é influenciado principalmente pela geometria da ponta do arame, sendo que obtém-se maior comprimento de arco para as condições de abertura com a ponta do arame arredondada e menor comprimento quando a ponta é cortada, conforme representado na Figura 2.18.

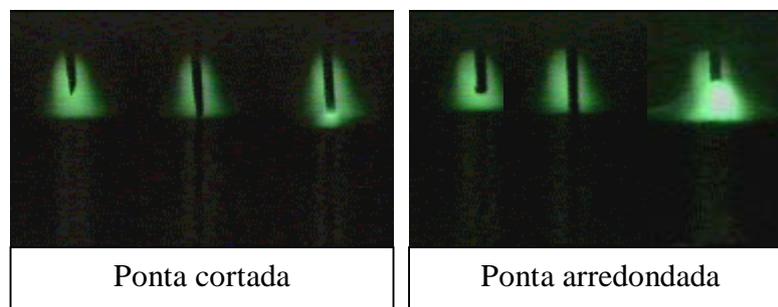


Figura 2.18 - Influência da geometria da ponta na abertura do arco, apresentada por Santos (2000)

Além da geometria da ponta do arame, devem ser considerados outros aspectos tais como a severidade da colisão do arame contra o metal de base e a característica estática da fonte de soldagem.

Estudos conduzidos por Rehfeldt e Bremer (1993) sobre o processo de abertura do arco MIG com alumínio, utilizando filmagem de alta velocidade, indicam que o arame-eletrodo, após movimento de aproximação, flamba devido à colisão contra o metal de base e a continuidade de avanço do arame imposta pelo alimentador. Este fenômeno também foi previsto e verificado para o aço, conforme apresentado por Zhu et al. (1997). Rehfeldt e Bremer (1993) com base em experimentos realizados apenas com fontes de tensão constante e ponta do arame cortada, verificaram que logo após a ignição, ocorrida próximo ao ponto de contato com o metal de base, o arco voltaico salta para o ponto de dobramento do arame-eletrodo próximo ao bico de contato. Após, a extremidade dobrada do arame, sob a influência de forças eletromagnéticas é destacada e expelida, resultando em um arco alto, estabelecido próximo ao bico de contato, conforme esquema apresentado na Figura 2.19. Neste sentido, esta proximidade do arco ao bico de contato, pode resultar em fusão do bico e interrupção do processo, não sendo uma condição adequada.

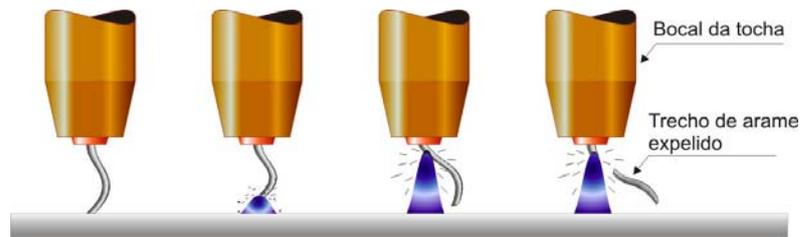


Figura 2.19 - Esquema da abertura do arco com ejeção da extremidade do arame construído com base nos estudos apresentados por Rehfeldt e Bremer (1993)

Quanto à característica estática da fonte de soldagem, as convencionais são de tensão constante, e este fato permite que a corrente atinja valores elevados, no momento do curto circuito, o que facilita a abertura do arco. Mesmo garantindo a abertura, estas fontes não garantem repetibilidade quanto ao processo de abertura do arco, conforme verificado por Santos (2000).

Em estudo apresentado por Farson et al. (1998) sobre o processo de abertura do arco MIG para o aço, com fonte de tensão constante, enfocando em especial a influência da geometria da ponta do arame-eletrodo, foram verificados dois tipos característicos de abertura, a explosiva e a suave. A explosiva ocorre quando a ignição se dá no comprimento médio do arame-eletrodo resultando em arco longo, e a suave, quando a ignição ocorre a partir do ponto de contato do arame-eletrodo com o metal de base resultando em arco curto. A abertura suave demanda uma menor energia e é mais provável de ocorrer quando a ponta do arame é cortada.

Para a soldagem do alumínio é amplamente aceito, em termos de qualidade e produtividade, o processo MIG pulsado, que utiliza fonte com imposição de corrente. A simples imposição de corrente, sem controle específico para a fase inicial, tornaria a abertura do arco tarefa difícil. A abertura do arco MIG com fontes de soldagem com imposição de corrente é baseada na imposição de elevados níveis de corrente no momento em que ocorre o contato entre arame-eletrodo e metal de base, produzindo o calor necessário para a abertura do arco voltaico, o que é similar ao observado no processo com fontes de tensão constante e, desta forma, apresenta o mesmo problema de falta de repetibilidade verificado com fontes com comando de tensão, podendo resultar em arco curto ou longo após a abertura.

2.3. Fundamentos sobre a recuperação de dutos em operação

Visando aplicação do processo MIG CA à soldagem em operação, foram realizadas pesquisas para identificar as possíveis condições de validade do processo para a realização da soldagem de reparo de dutos da área de petróleo. Neste sentido, foram identificadas referências que indicam condições térmicas limítrofes, além das quais há risco de perfuração

que, por estarem associadas a possibilidade de acidentes e interrupção de processos produtivos, foram tomadas como referência para proceder a avaliação inicial da aplicabilidade do processo MIG CA.

Na soldagem de dutos em operação, conforme Paes et al (2004), dentre as principais causas de perfuração estão as condições de baixa espessura dos dutos, aportes térmicos excessivos, o uso da técnica de oscilação do eletrodo e a soldagem na direção longitudinal. Paes et al (2004) relatam que, baseado em um trabalho desenvolvido para indústrias de petróleo, pelo Instituto Batelle, a condição necessária para ocorrência de perfuração de duto foi caracterizada pela temperatura interna ser superior a 980 °C. Mais precisamente, conforme Pope et al (2004), o risco de perfuração é iminente quando a temperatura na superfície interna do duto alcança valores superiores a 1260 °C e que foi arbitrado, por motivo de segurança, o valor de 980 °C para soldagem com eletrodos de baixo hidrogênio.

Os limites estabelecidos pelas pesquisas do Instituto Batelle, também são considerados como válidos, nos trabalhos desenvolvidos por Bruce (2000) que, a partir de ensaios realizados com eletrodos revestidos, estabelece limites práticos para os parâmetros e variáveis de soldagem, com base no aporte térmico e na corrente de soldagem. Deve-se considerar que o processo MIG CA estabelece uma nova condição de aquecimento e, desta forma, o uso do conceito de aporte térmico para estabelecer limitações deve ser questionado.

A soldagem de dutos em operação pode ser conduzida em duas condições, uma com fluxo interno de produto e outra sem, sendo que a primeira condição favorece o resfriamento e reduz o risco de perfuração mas, conforme Pope et al (2004), o limite de temperatura estabelecido está baseado na capacidade da seção remanescente, não fundida, resistir às tensões atuantes e que desta forma, o fluxo interno interfere na temperatura interna do tubo, mas não no limite estabelecido.

Com base nas referências é aceitável que possa ser considerada como condição limitante, para uma avaliação inicial da aplicabilidade do processo MIG CA, a temperatura máxima atingida no interior do duto, que deve ser inferior a 980 °C. A avaliação completa da aplicabilidade do MIG CA à recuperação de dutos em operação demandará estudos futuros, que devem considerar outras condições limitantes, tais como o risco de trincas, posições de soldagem e resistência mecânica, que embora sejam considerações imprescindíveis para estabelecer um parecer quanto à aplicabilidade do processo, não serão objeto do presente trabalho.

CAPÍTULO 3

3. ENSAIOS EXPLORATÓRIOS

Os ensaios exploratórios do processo MIG CA do alumínio foram iniciados com a montagem de uma bancada de ensaios na PUC-PR (Pontifícia Universidade Católica do Paraná), Figura 3.1, equipada com uma fonte de soldagem Inversal, um sistema de aquisição e controle e um sistema de deslocamento de tocha modelo Tartílope V1, todos de fabricação da empresa IMC - Soldagem.



Figura 3.1 – Bancada de ensaios da PUC-PR

Para adequação da bancada foi necessário o desenvolvimento de tecnologia aplicada à fonte Inversal, de forma a assegurar a reignição do arco após a mudança de polaridade, o que foi conseguido com a imposição de pulsos de elevada tensão, sincronizados com a mudança de polaridade. Para comandar no equipamento a forma de onda do MIG CA, foi elaborado um programa computacional em turbo pascal, denominado MIG2AC e a monitoração das variáveis de soldagem foi conduzida com o sistema de aquisição denominado SAP – Sistema de Aquisição Portátil, com frequência de aquisição de 5 kHz e equipado com sensor de corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás.

Após iniciados os ensaios exploratórios com alumínio, foi percebido que, freqüentemente, não ocorria a reignição do arco após a mudança de polaridade. Isto demandou da equipe do Labsolda o aprimoramento do sistema de reignição do arco, com cuidado especial quanto ao sincronismo de atuação. O funcionamento do novo sistema de reignição, pode ser verificado pelo comportamento das variáveis no momento da mudança de polaridade, apresentado na Figura 3.2.

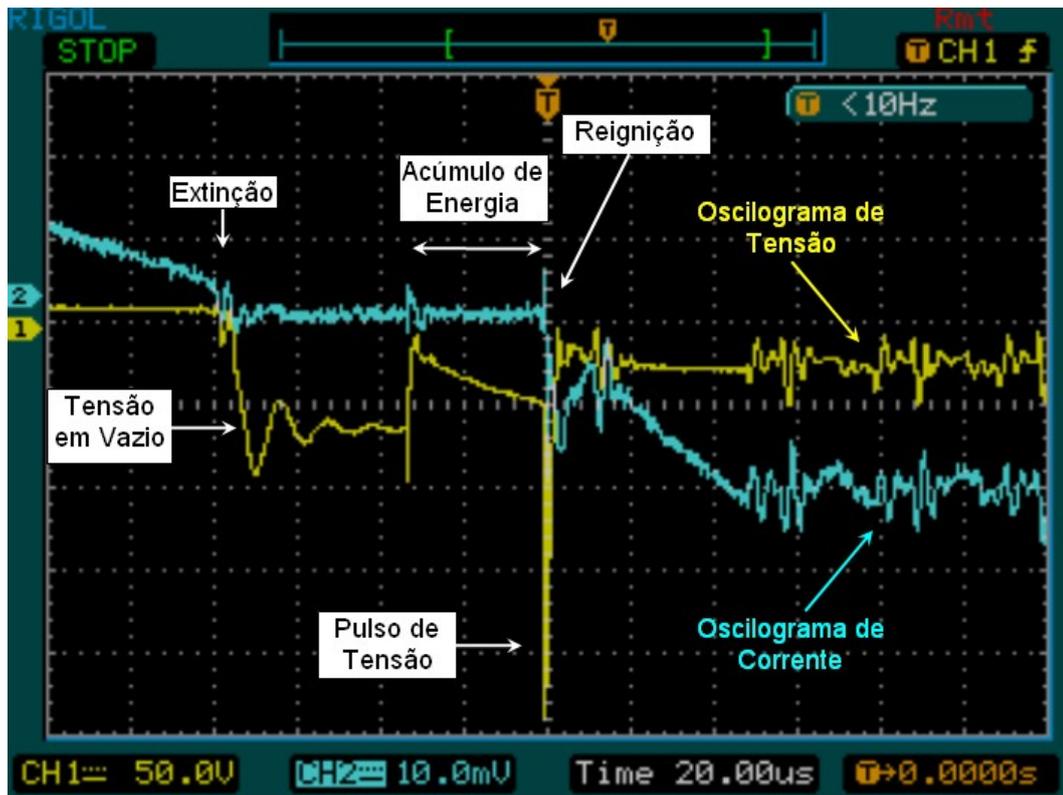


Figura 3.2 – Oscilogramas de tensão e corrente durante a extinção e reignição do arco

Durante a mudança de polaridade ocorre a extinção do arco, sendo verificado que a corrente cai a zero e a tensão assume valores de tensão em vazio. Após aproximadamente 40 μ s, ocorre a atuação do sistema de reignição, que coloca em curto a saída da máquina, iniciando um processo de acúmulo de energia. O processo de acúmulo de energia dura aproximadamente 30 μ s, após o que, a energia é liberada gerando um pulso de tensão que pode chegar a 600 V, promovendo a reignição do arco, caracterizada pelos níveis de tensão e corrente típicos da condição de arco aberto. O funcionamento completo deste sistema é apresentado por Gohr (2002).

Diferentemente do alumínio, para o aço, foi verificado que durante a mudança de polaridade, principalmente na mudança de positiva para negativa, após a extinção do arco,

pode ocorrer a reignição antes que o sistema de reignição atue. Como este comportamento não é constante, a atuação do sistema de reignição é necessária para assegurar a reignição do arco.

Mesmo com o aprimoramento da fonte de soldagem, ensaios realizados com alumínio, com várias combinações de níveis de corrente de base, positiva e negativa, abaixo de 40 A (20, 25 e 30 A), apresentaram frequentemente falha na reignição do arco após a mudança de polaridade, conforme indicado na Figura 3.3.

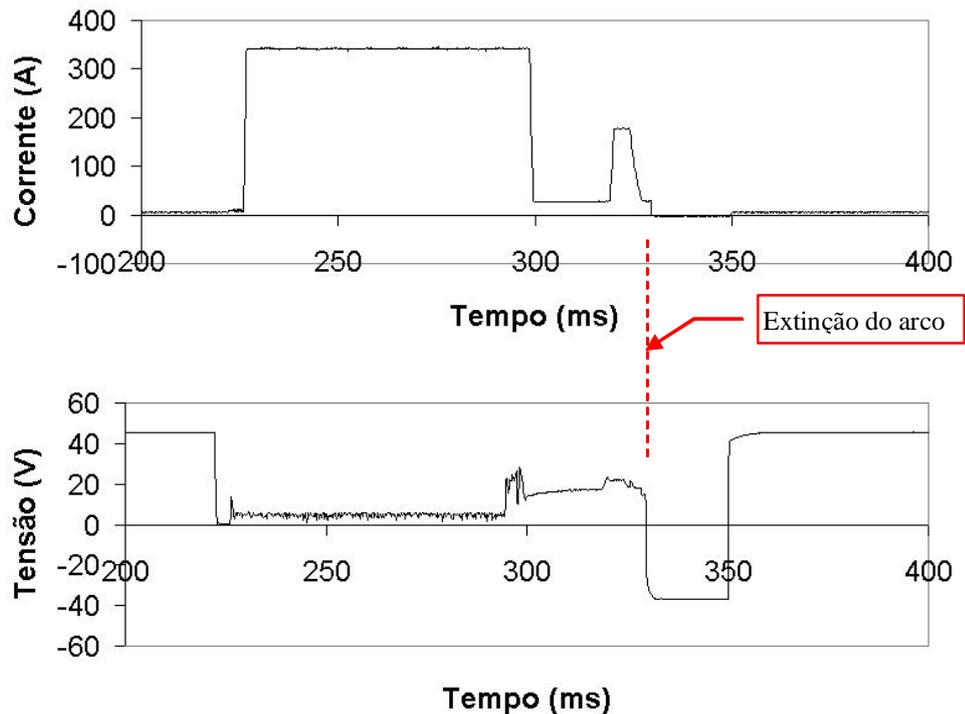


Figura 3.3 Oscilogramas de Corrente e Tensão - extinção do arco, alumínio, arame ER-4043 de 1,2 mm de diâmetro

Visando a utilização de níveis de corrente da ordem de 20 A nos intervalos de base positiva e base negativa, considerado fator importante para reduzir a corrente de soldagem, foi identificada como alternativa, o uso de um pico de corrente de 40 A com duração inferior a 1 ms, antes e após a mudança de polaridade, conforme Figura 3.4. Este recurso assegurou a reignição do arco após a transição, mesmo para baixos níveis de corrente de base.

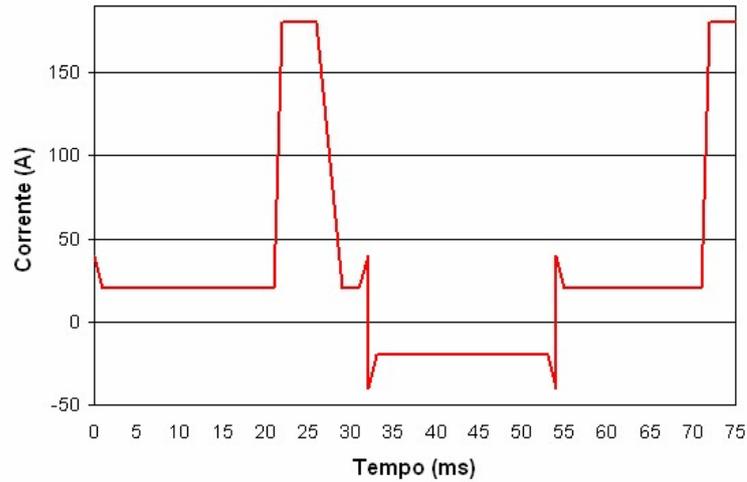


Figura 3.4 – Forma de onda de corrente com pulsos anterior e posterior à mudança de polaridade, alumínio, arame ER-4043 de 1,2 mm de diâmetro

Para avaliar a estabilidade do arco MIG CA nestas condições, foram conduzidos ensaios com diversas durações dos intervalos de base positiva e negativa, que indicaram a estabilidade do arco, ou seja, houve reignição do arco, mesmo para tempos de base da ordem de 50 ms e baixos níveis de corrente, conforme Figura 3.5.

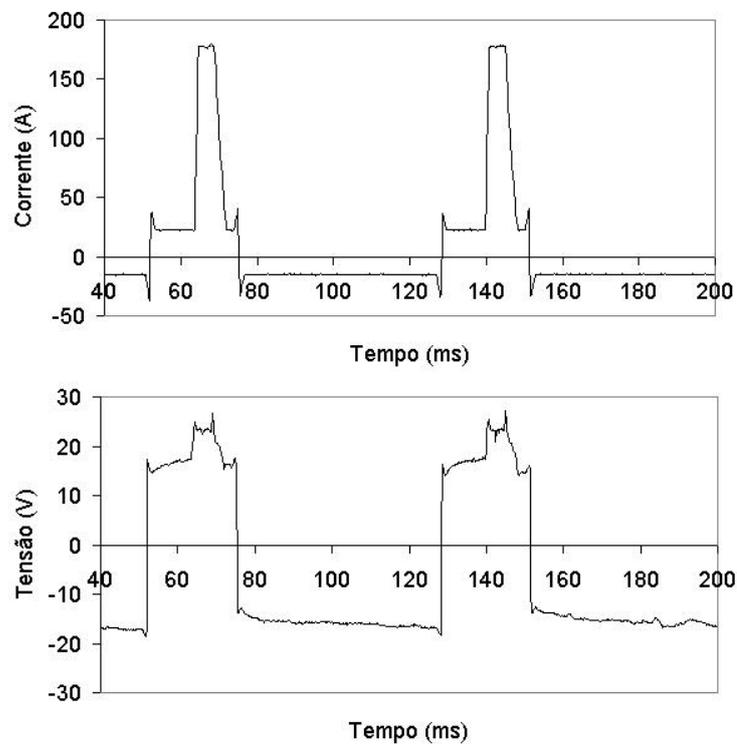


Figura 3.5 - Oscilogramas de Corrente e Tensão ($I_n = 15 \text{ A}$; $t_n = 50 \text{ ms}$), alumínio, arame ER-4043 de 1,2 mm de diâmetro

Após a o êxito na operacionalização do processo MIG CA do alumínio, com os aprimoramentos da fonte de soldagem e da forma de onda de corrente, foram realizados experimentos com deposição de cordões sobre chapa, juntas sobrepostas e filete, conforme figuras 3.6, 3.7 e 3.8.

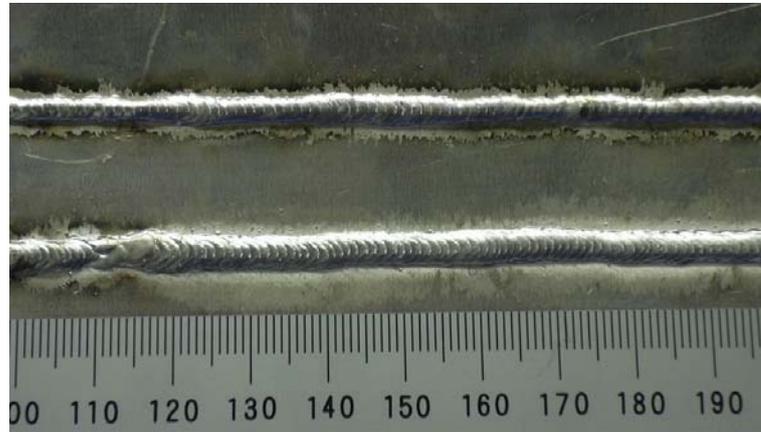


Figura 3.6 - Cordões depositados – Alumínio, chapa de 0,8 mm de espessura



Figura 3.7 - Junta sobreposta MIG CA – Alumínio, chapas de 1 mm de espessura



Figura 3.8 - Junta de filete MIG CA – Alumínio, chapa de 1 mm de espessura

Nos experimentos iniciais foi verificado que os valores usuais das variáveis de pulso, corrente e tempo de pulso, do processo MIG pulsado, se mostraram adequadas também para o MIG CA do alumínio ($I_p=170$ A; $t_p=5,7$ ms). Posteriormente o mesmo foi verificado para o aço ($I_p=300$ A; $t_p=4$ ms). Os experimentos, apesar de indicarem boa operacionalidade, indicaram dificuldades quanto a estabilidade do comprimento de arco a ponto de comprometer os ensaios. Neste sentido, foi avaliado o comportamento de outra fonte de soldagem quanto à estabilidade do comprimento do arco. A fonte utilizada foi a Sensarc – AL350, fabricada pela Kobelco, que permite a soldagem MIG CA do alumínio.

Nos ensaios com a Sensarc, foi obtida uma razoável estabilidade do comprimento de arco para variações progressivas da distância bico peça, conforme Figura 3.9, entretanto para condições com variação discreta (degrau), mesmo para variações de 2 mm, não foi obtido do sistema de controle a resposta adequada, conforme Figura 3.10 (a) e (b). Durante os ensaios com a Sensarc foi verificado, em alguns casos, a ocorrência de falha na abertura do arco, como indicado nas figuras 3.9 e 3.10(a).



Figura 3.9 - Depósito obtido com variação progressiva da distância bico peça

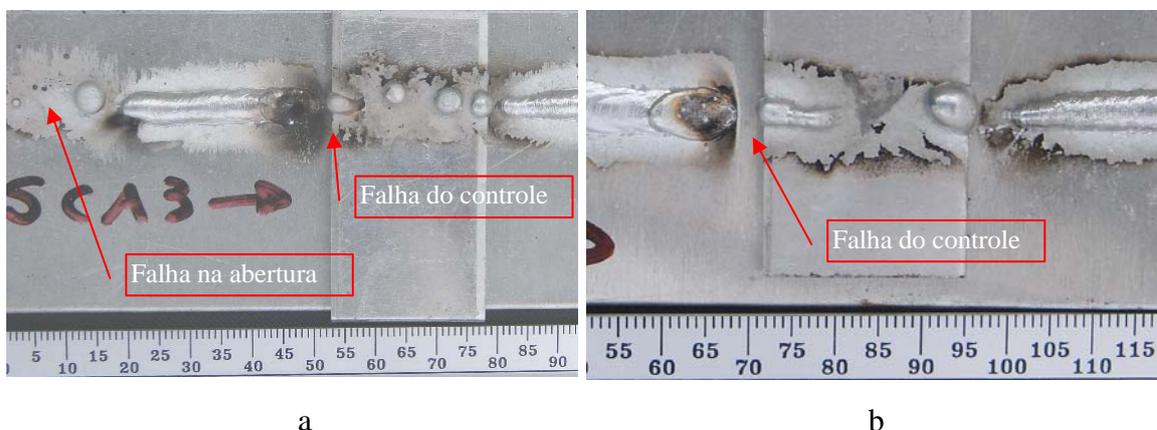


Figura 3.10 - Depósitos obtidos com variação discreta de distância bico peça (a) Variação de 3 mm e (b) Variação de 2 mm

Por outro lado, nos experimentos com a fonte Inversal, foi verificada a ocorrência de curto circuito ao longo da soldagem, o que poderia ser evitado por um sistema eficaz de controle do comprimento do arco. O desenvolvimento de um sistema de controle de comprimento de arco tornou-se um desafio para a adequada operacionalização da soldagem do alumínio, tanto com o processo MIG CA como com o processo MIG pulsado. Este tema foi abordado por Santos (2000) que realizou experimentos com controle proporcional atuando na modulação do tempo de base.

Como o sistema de controle de comprimento do arco pode atuar variando a taxa de fusão do arame ou a taxa de alimentação deste, identificam-se como alternativas, a modulação da amplitude de corrente de base (AM) e a modulação do tempo de base (FM), que promovem a variação da corrente média e assim da taxa de fusão do arame e, de outra forma, a modulação da velocidade do arame, que promove a variação da taxa de alimentação deste.

Com base na relação entre a corrente média e as variáveis de corrente de base e tempo de base do processo MIG pulsado, apresentada na Figura 3.11, foi simulada a alteração de uma ou de outra variável e seu efeito sobre a corrente média, ou taxa de fusão do arame, de forma a permitir uma análise inicial para seleção do sistema de controle.

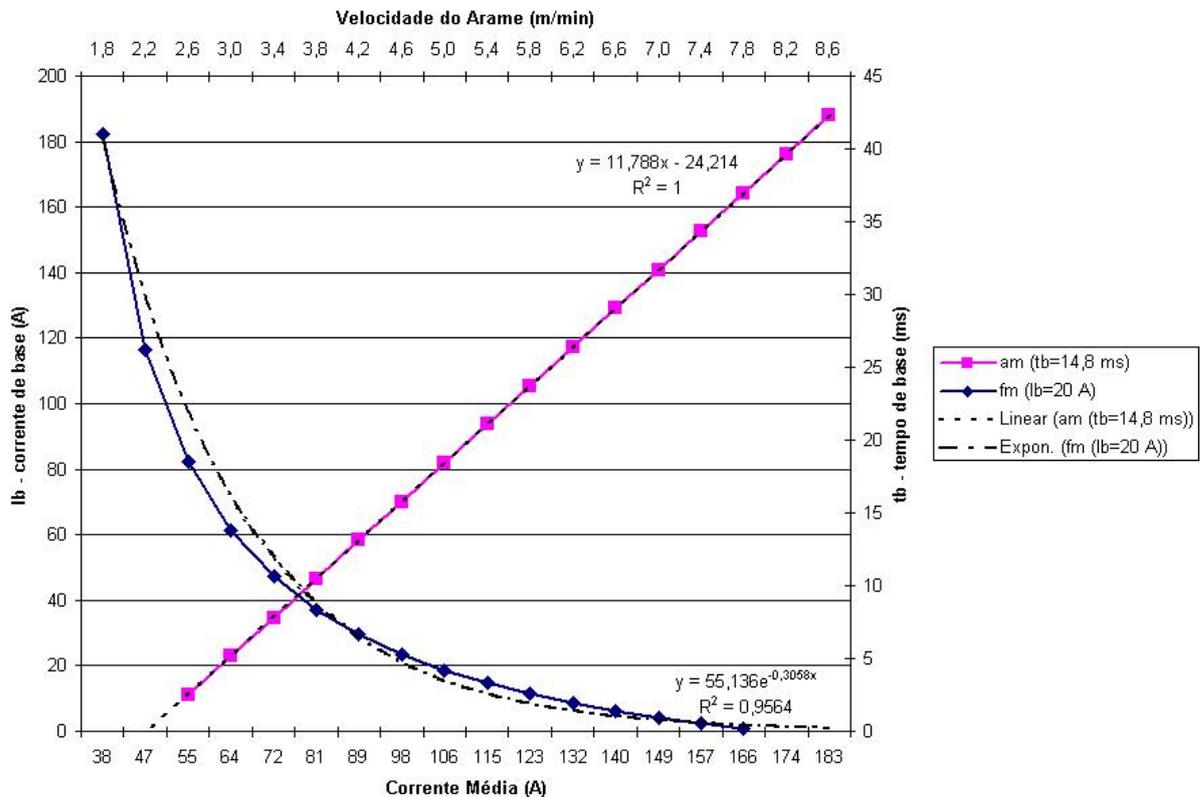


Figura 3.11 - Relação entre Corrente média e amplitude e duração da base

Conforme Figura 3.11 a resposta de taxa de fusão à modulação do tempo de base não é linear, o que torna o sistema de controle mais complexo para esta opção. Foram conduzidos

ensaios utilizando um controlador PID atuando no tempo de base e foi verificado que esta técnica resulta em significativas variações de ruído, percebidas pelo soldador e diferentes velocidades de resposta para as condições de arco curto e longo, sendo a correção muito rápida na primeira condição e muito lenta na segunda.

A modulação da amplitude de corrente, além de não ser percebida pelo soldador, permite variar linearmente a taxa de fusão com a amplitude da corrente de base, o que torna o sistema de controle mais simples.

A modulação da velocidade do arame foi explorada inicialmente e considerada, a princípio, inviável, devido à dinâmica de resposta do sistema de alimentação, que é influenciada por diversos componentes, como a resposta do motor elétrico e a existência de folgas mecânicas no redutor, tracionador e conduíte.

Com base nas análises realizadas optou-se por desenvolver um sistema de controle de comprimento de arco baseado na modulação da corrente de base (I_b). Verificou-se posteriormente que a modulação da corrente de base interferia na tensão resultando em um sistema de controle complexo, por interferir na variável que está sendo monitorada. Para minimizar este efeito foi proposto identificar a relação entre a tensão e a corrente, de modo a permitir corrigir a leitura da tensão para continuar sendo representativa do comprimento do arco, mesmo com a ação do sistema de controle sobre a amplitude da corrente de base.

Entre os aspectos observados nos experimentos MIG CA do Alumínio, na busca por reduzido aquecimento das chapas, foram utilizadas condições para as quais a limpeza catódica foi comprometida, provavelmente, por resíduos da camada protetora usada comercialmente, constituída de um filme plástico, conforme figuras 3.12 e 3.13, o que sugere maiores investigações quanto ao efeito desta proteção, uma vez que, industrialmente, muitos consideram a chapa limpa após a remoção do filme protetor.

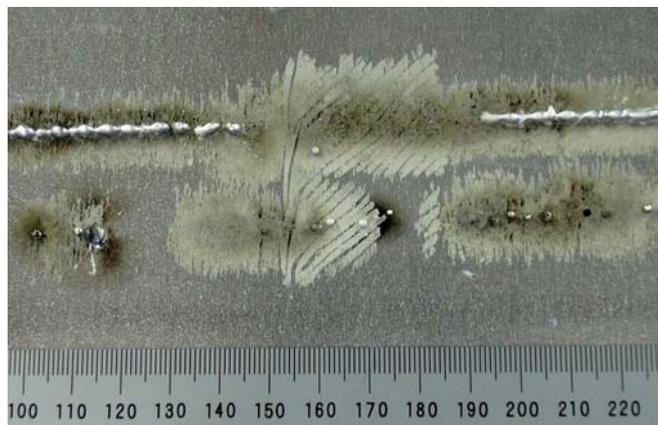


Figura 3.12 - Comprometimento da limpeza catódica no MIG CA

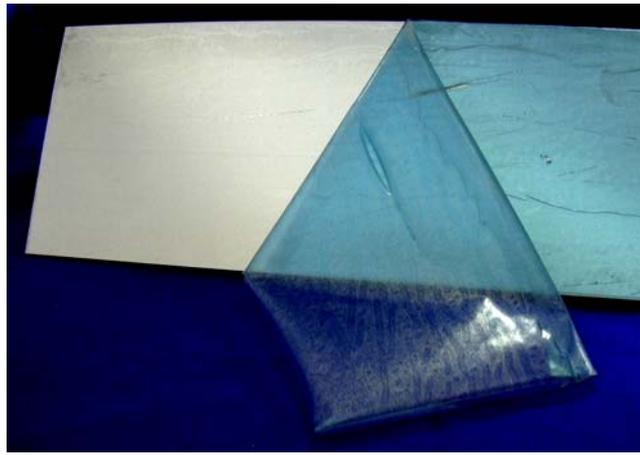


Figura 3.13 - Filme protetor de chapas de alumínio

Nos ensaios com a fonte Inversal e em alguns ensaios com a Sensarc, foi percebida a ocorrência de curto circuito durante a soldagem. Na soldagem de chapas finas, foram identificados casos, com ambas as máquinas, nos quais, após o curto circuito, o sistema de abertura do arco, utilizando elevados níveis de corrente, promoveu a perfuração do metal de base, conforme Figura 3.14.



Figura 3.14 - Perfuração do metal de base durante reabertura do arco - Alumínio.

Os resultados, verificados com ambas as fontes, indicam que a técnica de abertura de arco utilizada, com elevados níveis de corrente, não atende adequadamente algumas condições de soldagem propostas. Oportunamente, foi identificado no Labsolda da UFSC o uso experimental de outra técnica de abertura do arco, destinada ao processo Plasma-MIG que utilizava o retorno do arame. Com base nos testes com Plasma-MIG, identificou-se perspectivas para aprimorar esta técnica de abertura, visando obter um processo de abertura com baixos níveis de energia e que permitisse o ajuste do comprimento do arco imediatamente após a abertura do arco, tornando-o adequado à soldagem de chapas finas.

Tendo em vista aplicações diversas como o Plasma-MIG e o MIG CA em chapas finas, foi proposto um estudo metódico desta técnica de abertura de arco, que demandou a adequação do equipamento de soldagem, do cabeçote alimentador e da fonte de soldagem,

além do desenvolvimento de programas de aquisição e controle, para implementar a lógica de abertura proposta e a execução de experimentos para avaliar o comportamento de todo o conjunto, o que está apresentado neste trabalho.

O novo cabeçote foi desenvolvido com sistema de controle de reversão que, comandado pelo sistema de monitoração e controle da fonte de soldagem, permitiu o retorno do arame, sincronizado com o processo de abertura proposto.

Durante os testes da lógica da abertura com retorno do arame previa-se que o arame seria avançado a uma determinada velocidade, com a fonte de soldagem habilitada, gerando uma leitura de tensão em vazio e o contato do arame com o metal de base seria identificado pela queda da tensão. O fato de a fonte estar habilitada fez com que para as condições de geometria da ponta do arame cortada, houvesse a abertura do arco instantânea e devido à inércia do sistema e folgas no conduíte, em função da continuidade do avanço do arame, a extremidade do arame-eletrodo tocava novamente o metal de base e aderiria a ele, antes que fosse iniciado o movimento de retorno do arame, com comportamento semelhante ao processo denominado “*stud welding*”, conforme Figura 3.15.

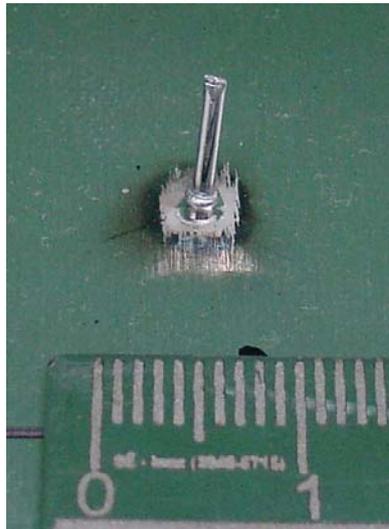


Figura 3.15 - Aderência do arame durante a abertura, similar ao “*stud welding*”

Outras lógicas implementadas também resultaram em aderência do arame como apresentado na Figura 3.15, e para evitar a soldagem do arame com o metal de base, a fonte de soldagem foi modificada, de forma a disponibilizar uma tensão em vazio da ordem de 20 V, com corrente da ordem de 20 mA, sendo a fonte mantida desabilitada até que fosse comandado o retorno do arame, o que evitou a abertura do arco com o arame ainda em avanço.

CAPÍTULO 4

4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.1. Procedimento para estudo da relação entre tensão e comprimento de arco para o alumínio.

Conforme revisão bibliográfica apresentada foi encontrada uma divergência quanto à utilização da tensão de base ou de pulso como referencial do comprimento de arco e, diante da existência, para o MIG CA, de mais outros intervalos correspondentes a uma fase positiva e uma fase negativa imediatamente após o pulso, identificou-se a necessidade de avaliar o comportamento da tensão nas diversas condições impostas pela forma de onda do MIG CA.

A argumentação para não utilização da tensão de base como referência do comprimento do arco, verificada na revisão bibliográfica, foi justificada pela possível variação na tensão do arco quando em correntes baixas, devido a saltos dos pontos de emissão catódica. Em contraposição, a não utilização dos sinais de tensão de pulso, foi justificada pelo fato dos sinais estarem sujeitos a maiores níveis de ruído, devido à elevada corrente nesta fase e a ocorrência de oscilação dos sinais de tensão decorrente do destacamento de gota.

Diante do exposto foi proposto avaliar experimentalmente as duas argumentações, utilizando a forma de onda apresentada na Figura 4.1, na qual foi inserido um intervalo de curta duração, com amplitude de corrente elevada (100 A), porém inferior à de transição, ou seja, com amplitude de corrente intermediária, evitando os ruídos dos sinais de tensão no pulso e as variações da tensão na base.

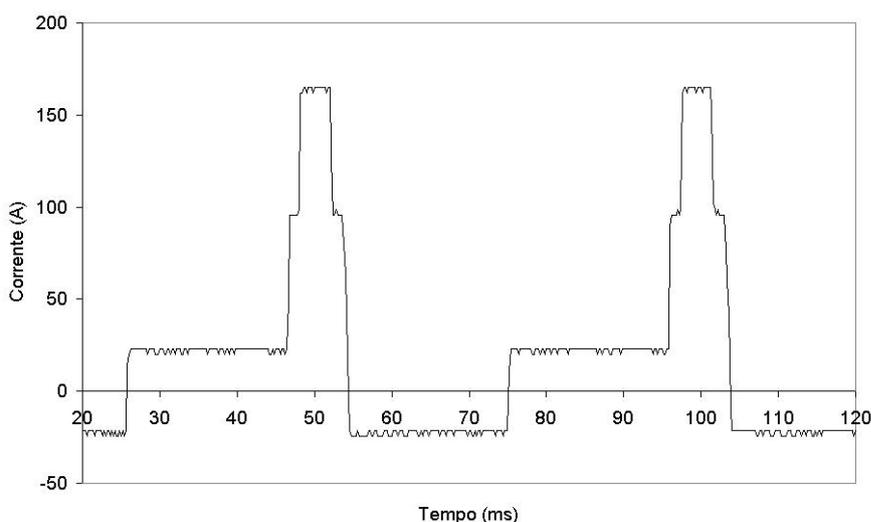


Figura 4.1 – Forma de onda MIG CA com 5 intervalos

A forma de onda de corrente apresentada na Figura 4.1 foi estruturada com uma seqüência de intervalos com distintos patamares de corrente, conforme seqüência apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Seqüência de intervalos para experimentos de identificação da relação Tensão x Comprimento de arco

Intervalo	Descrição do intervalo	Corrente (A)	Duração (ms)
1	Base positiva	20	21
2	Base pré-pulso (positiva imediatamente anterior ao pulso)	100	2
3	Pulso	170	4,1
4	Base pós-pulso (positiva imediatamente posterior ao pulso)	100	2
5	Base negativa	-20	21

Os experimentos foram conduzidos aplicando-se a forma de onda apresentada, com os cinco intervalos distintos conforme Tabela 4.1, para diferentes comprimentos de arco, conforme Tabela 4.2. O ajuste do comprimento do arco foi obtido mediante o ajuste da velocidade de arame, inicialmente prevista para 2 m/min. O comprimento de arco foi verificado visualmente, utilizando um objeto como referência de altura, colocado ao longo da trajetória de deslocamento da tocha.

Tabela 4.2 – Conjunto de experimentos com cinco intervalos e variação do comprimento de arco

Código do experimento	Pat03	Pat06	Pat09	Pat12
Comprimento de arco (mm)	3	6	9	12

Para realização destes experimentos foi utilizado o programa MIG2AC, elaborado em programação turbo pascal, sendo a tela principal conforme Figura 4.2. Na programação foram inseridas as variáveis operacionais, incluindo amplitude e duração de cada fase da forma de onda de corrente. No programa MIG2AC, devido à mudança periódica de polaridade e conseqüente leitura de tensão e corrente com valores próximos de zero, foram implementadas rotinas para desconsiderar estas leituras, além de outras rotinas específicas para identificar condições de curto circuito e extinção de arco. O programa também contemplou ajustes das variáveis de abertura do arco necessários à operacionalização do processo.

tensao de Referencia [U] :	17.00	dinamica Kt [] :	0.10
Corrente negativa [A] :	-20.00	tempo Negativo [ms] :	20.00
corrente base [A] :	20.00	tempo Base [ms] :	20.00
velocidade arame [m/min] :	2.30	tempo base pos [ms] :	0.00
GERAIS			
Tensao extinto [U] :	40.00		
tensao curto [U] :	8.00		
tensao Abertura [U] :	17.00		
tempo extinto [ms] :	3.00		
tempo curto [ms] :	3.00		
tempo abertura [ms] :	4.00		
Velocidade aprox [%] :	60.00		
corrente De abert. [A] :	350.00		
TECLAS DE FUNCAO		SITUACAO	
Q - SAIR	0.0	HABIL.	
Z - ZERA N. CC e EXT		N. CC [0]	Ua [0.0]
		N. EXT [0]	fase [0]
		Ua [0.0]	IS [350]

Figura 4.2 - Tela do programa MIG 2 AC

Os ensaios foram realizados com deposição de cordão sobre chapas de alumínio 1200 H14 com 2 mm de espessura, sendo mantida a distância bico peça de 15 mm. Nestes ensaios foi efetuada a monitoração da tensão e da corrente com o sistema SAP, descrito no capítulo anterior. Os dados coletados foram tratados em planilha eletrônica para segregação dos dados correspondentes a cada intervalo especificado na Tabela 4.1, e foi avaliada a tensão média e o desvio padrão da tensão em cada intervalo.

4.2. Metodologia para avaliação do controle do comprimento de arco para o alumínio

Para identificar alternativas viáveis, visando promover a estabilidade do comprimento de arco, foram propostas e implementadas rotinas para controle do comprimento do arco nos programas computacionais desenvolvidos para este trabalho. Inicialmente foi inserido no programa MIG2AC uma rotina baseada apenas em controle proporcional do tempo de base, Figura 4.3. O programa efetuava leitura da tensão média no intervalo da fase de base positiva (U_{am}), calculava a média da tensão de base dos últimos períodos (NPERIODO), comparava este valor com o de referência (U_{ref}) e conforme uma constante de proporcionalidade (K_t) era ajustado o tempo de base (N_{tbase}), resultando em mudança da corrente média e em consequência, variação da taxa de fusão do arame e do comprimento do arco.

```

begin
  fase := FBASE;
  NIS := NIBASE;
  deltat := 1;
  inc(contref);
  if contref > NPERIODO then
    begin
      uam := uam/(NPERIODO*(Ntneg-DTESPERANEG));
      uamaux := uam;
      if (uam > urefmax) or (uam < urefmin) then
        begin
          Ntbase := round(Ntbase + (uam - uref)*kt);
          if Ntbase < DTBASE then Ntbase := DTBASE;
          else if Ntbase > DTBASEMAX then Ntbase := DTBASEMAX;
          uam := 0;
          contref := 1;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

```

Figura 4.3 – Rotina de controle proporcional do MIG2AC

Estes ensaios foram realizados com alumínio, utilizando arame ER 4043 com 1,2 mm de diâmetro. Não foi obtido êxito com o uso do controle proporcional proposto, que permitisse a adequada realização de ensaios para avaliação do sistema, o que indicou a necessidade de estudo de técnicas mais avançadas para controlar o comprimento do arco. Para utilização de rotinas de controle mais avançadas, optou-se por abandonar o programa MIG2AC e desenvolver as rotinas de controle em um novo sistema, denominado SICA – Sistema Integrado de Controle e Aquisição.

O SICA – Sistema Integrado de Controle e Aquisição, foi desenvolvido pelo Labsolda da UFSC, sendo composto por um conjunto de programas computacionais que trabalham de forma integrada com a fonte de soldagem, figuras 4.4 e 4.5. O SICA utiliza um programa para controle da fonte de soldagem, denominado SACOSCR, desenvolvido em ambiente DOS que executa as rotinas de comando e aquisição de sinais da fonte de soldagem. As referências para as variáveis relativas à corrente de soldagem e velocidade de arame, são recebidas, via comunicação serial, de outro computador, que executa o programa denominado SAC (Sistema Avançado de Controle), este desenvolvido em ambiente windows para permitir a fácil construção de complexas formas de onda de corrente.

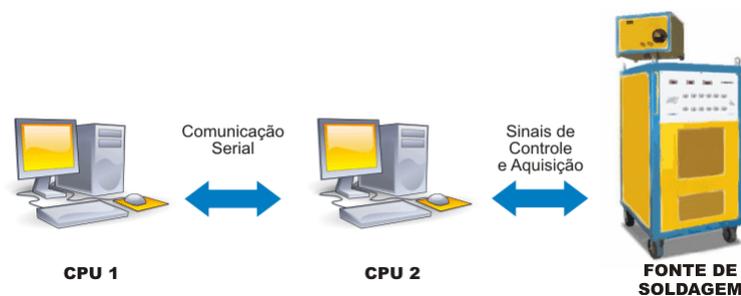


Figura 4.4 – Esquema do SICA – Sistema Integrado de Controle e Aquisição



Figura 4.5 - Conjunto SICA – Sistema Integrado de Controle e Aquisição

Foi incorporado aos programas, opções de rotinas de controle PID (Proporcional, Integral, Derivativo) com opção de atuar na modulação da frequência (variando o tempo de base) ou na modulação da amplitude (variando a corrente de base) ou na modulação da taxa de alimentação do arame (variando a velocidade do arame). As diversas rotinas de controle desenvolvidas pela equipe do Labsolda –UFSC, bem como os respectivos ajustes obtidos, estão apresentados em Locatelli (2007).

Com base na análise das alternativas de controle, apresentadas nos ensaios exploratórios, decidiu-se desenvolver os experimentos com sistema de controle PID atuando na modulação da amplitude da corrente de base, conforme rotina apresentada na Figura 4.6.

```

Procedure CalcularPID_Ib(VariavelDeControle,g1,g2,g3,g4:real);
begin
  ControleP := g1*VarRealimentacao;
  ControleI := VariavelDeControle+g2*VarRealimentacao;
  ControleD := g3*ControleD_anterior - g4*(VarRealimentacao-erro_anterior);
  erro_anterior := VarRealimentacao;
  ControleD_Anterior := ControleD;
  VarRealimentacao:= ControleP+ControleI+ControleD;
end;

```

Figura 4.6 - Algoritmo do controlador PID

Para simplificar os estudos iniciais relativos ao sistema de controle do comprimento do arco, os ensaios foram realizados apenas com processo MIG pulsado, ou seja, sem uso da corrente alternada. Após ensaios exploratórios com alumínio, conforme metodologia e resultados apresentados por Locatelli (2007), foram identificadas, para um controlador com

malha de realimentação de $200\mu\text{s}$, as constantes mais adequadas ao controlador PID atuando na corrente de base (I_b).

Foram realizados experimentos com alumínio, com deposição sobre chapas, inicialmente sem variação da distância bico peça, e, em seguida, com variações progressivas de comprimento do arco, mediante variação da distância bico peça, tanto no sentido de aproximação como de afastamento, conforme sentido de deslocamento da tocha, Figura 4.7. Para atender a estas condições foi proposto o conjunto de experimentos apresentado na Tabela 4.3, que foi executado conforme condições, parâmetros e variáveis, apresentadas na Tabela 4.4. Nestes experimentos foi efetuada a monitoração da tensão e corrente e os respectivos oscilogramas foram analisados comparativamente, para avaliação da estabilidade do comprimento do arco.

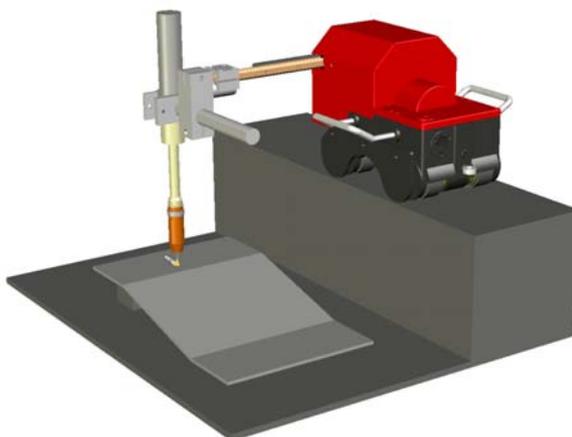


Figura 4.7 – Esquema de deslocamento com variação da distância bico peça.

Tabela 4.3 - Conjunto de experimentos para avaliação do controle baseado em modulação da amplitude da corrente de base

Código do experimento	Inclinação	Controle
SRCC1	0°	COM CONTROLE
SRCC2	0°	COM CONTROLE
RDSC1	-30°	SEM CONTROLE
RDSC2	-30°	SEM CONTROLE
RSSC1	30°	SEM CONTROLE
RSSC2	30°	SEM CONTROLE
RDCC1	-30°	COM CONTROLE
RDCC2	-30°	COM CONTROLE
RSCC1	30°	COM CONTROLE
RSCC2	30°	COM CONTROLE

Tabela 4.4 - Conjunto de parâmetros e variáveis dos experimentos para avaliação do controle de comprimento de arco

Descrição	Simbologia / unidade	Valor
Tensão de Referência	Uref (V)	17
Corrente média inicial	Im ₀ (A)	76
Corrente de base inicial	Ib ₀ (A)	40
Tempo de base	tb (ms)	14,8
Corrente de pulso	Ip (A)	170
Tempo de pulso	tp (ms)	5,7
Velocidade do arame	Va (m/min)	3,4
Velocidade de soldagem	Vs (cm/min)	30
Gás de Proteção		Ar
Vazão de Gás	Vz (l/min)	15
Arame		ER-4043
Diâmetro do arame	de (mm)	1,2
Distancia bico peça	DBCP (mm)	5 a 15
Tipo de tocha		Reta
Inclinação da tocha	Graus	0
Chapa		Al 1200 H14
Espessura da chapa	e (mm)	3

4.3. Metodologia para identificação da relação entre tensão de base, corrente de base e comprimento de arco para o alumínio

Como os resultados dos experimentos propostos no item 4.1 indicaram a tensão na base positiva como mais adequada para referenciar o comprimento do arco e que o sistema de controle proposto no item 4.2, modula a corrente de base, a leitura da tensão de base é afetada, prejudicando o sistema de controle do comprimento do arco. Para minimizar a influência da variação da corrente de base no sistema de controle, buscou-se identificar a influência desta, sobre a tensão de base, de forma a estabelecer uma relação que possibilitasse corrigir a indicação do comprimento de arco fornecida pela tensão de base. Neste contexto, foram propostos experimentos para identificar a relação entre a tensão de base, a corrente de base e o comprimento do arco.

Buscando assegurar que o comprimento do arco durante os ensaios fosse o estabelecido no projeto experimental, foi construído um dispositivo para referenciar visualmente o comprimento do arco conforme figuras 4.8, 4.9 e 4.10. Este dispositivo foi constituído de uma lâmina com posição vertical ajustável, fixada junto ao bocal da tocha. Foi utilizada uma tocha TIG, com arco aberto, funcionando como luz de fundo, permitindo ao soldador a verificação do comprimento do arco, por meio da visualização das sombras do

arame e da lâmina de referência, tendo sido realizadas algumas filmagens dos experimentos, embora com sistema convencional de filmagem VHSC.



Figura 4.8 – Conjunto para ensaios com referência visual de comprimento de arco



Figura 4.9 - Dispositivo para referenciar visualmente o comprimento do arco.



Figura 4.10 – Esquema dos ensaios com referência visual do comprimento de arco

Apesar do esforço para adequar o sistema de verificação do comprimento do arco, sem um sistema de visualização adequado não seria possível avaliar a variação da tensão para pequenas variações de corrente de base. Caso fossem realizados ensaios para cada combinação entre corrente de base e comprimento de arco pretendida, haveria variação aleatória do comprimento do arco entre um experimento e outro, que implicaria em significativa variação da tensão, comprometendo os resultados. Desta forma, visando eliminar a variação da tensão, decorrente de variação aleatória entre um experimento e outro com o mesmo comprimento do arco pretendido, foi desenvolvida uma metodologia experimental utilizando uma forma de onda com intervalos de diferentes amplitudes de corrente em um mesmo período, denominada onda escalonada, Figura 4.11. Este recurso permitiu realizar apenas um experimento para cada comprimento de arco e, no mesmo experimento, avaliar a relação entre a tensão de base e cada um dos diversos níveis de corrente de base, conforme Tabela 4.5.

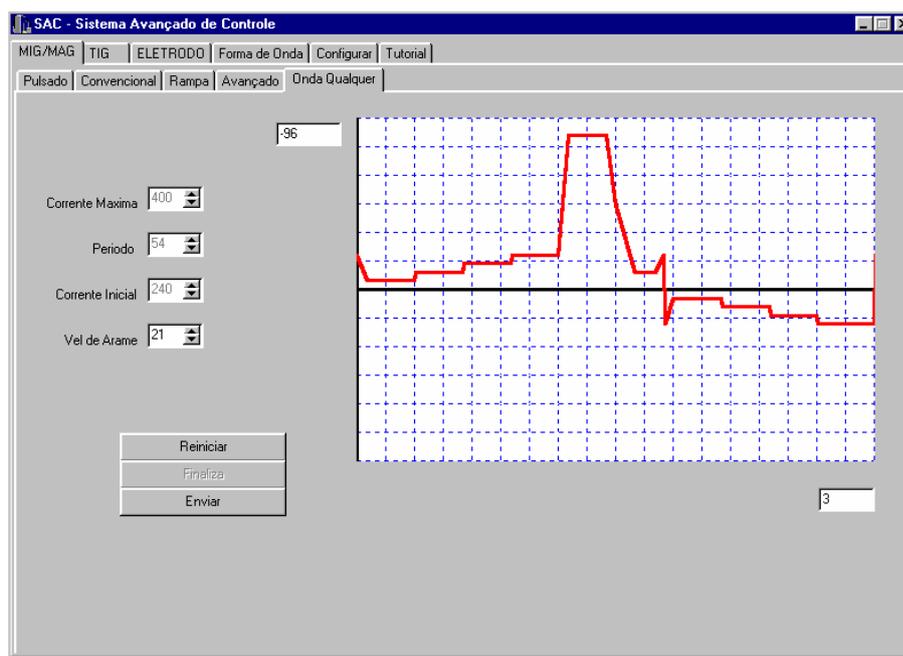


Figura 4.11 – Forma de onda escalonada

Tabela 4.5 - Conjunto de experimentos com forma de onda escalonada e variação do comprimento de arco - Alumínio

Código do experimento	Comprimento de arco (mm)	Corrente de base (A) - Onda escalonada com 4 níveis de corrente de base			
		14	23	33	42
OEH6	6	14	23	33	42
OEH8	8	14	23	33	42
OEH10	10	14	23	33	42
OEH12	12	14	23	33	42

Este conjunto de experimentos com alumínio foi conduzido utilizando o SICA – Sistema Integrado de Controle e Aquisição, apresentado anteriormente.

Com base nos resultados foi identificada a relação entre a tensão de base, a corrente de base e comprimento do arco. Para verificar a validade da relação identificada, foram conduzidos novos experimentos, utilizando uma forma de onda operacional para o MIG CA, com apenas um nível de corrente de base (20 A), conforme Figura 4.12.

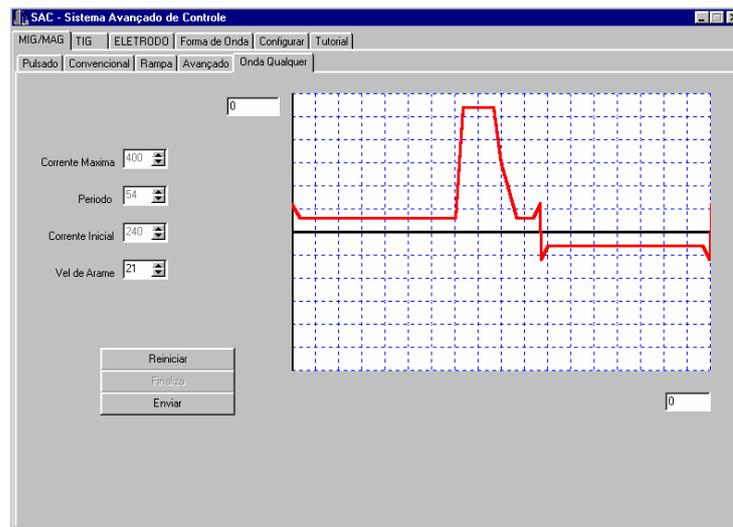


Figura 4.12 – Forma de onda de corrente para verificação da validade da relação identificada entre a tensão e o comprimento de arco.

4.4. Metodologia para estudo da abertura com retorno do arame para o alumínio.

Para desenvolver uma técnica que assegurasse a repetibilidade do processo de abertura suave do arco, ou seja, que ocorresse sempre no ponto de contato do arame eletrodo com o metal de base, que utilizasse baixos níveis de corrente de abertura e que resultasse em comprimento de arco adequado, imediatamente após a abertura, foi elaborada uma técnica inovadora para abertura do arco, utilizando a lógica de abertura com retorno do arame. A abertura do arco com retorno do arame foi estruturada com a rotina de avançar o arame até tocar no metal de base e, após o contato, comandar simultaneamente o retorno do arame e a aplicação de baixo nível de corrente, até que fosse atingido o comprimento de arco desejado, finalizando a fase de abertura de arco e passando o processo para o regime de soldagem, conforme esquema apresentado na Figura 4.13.

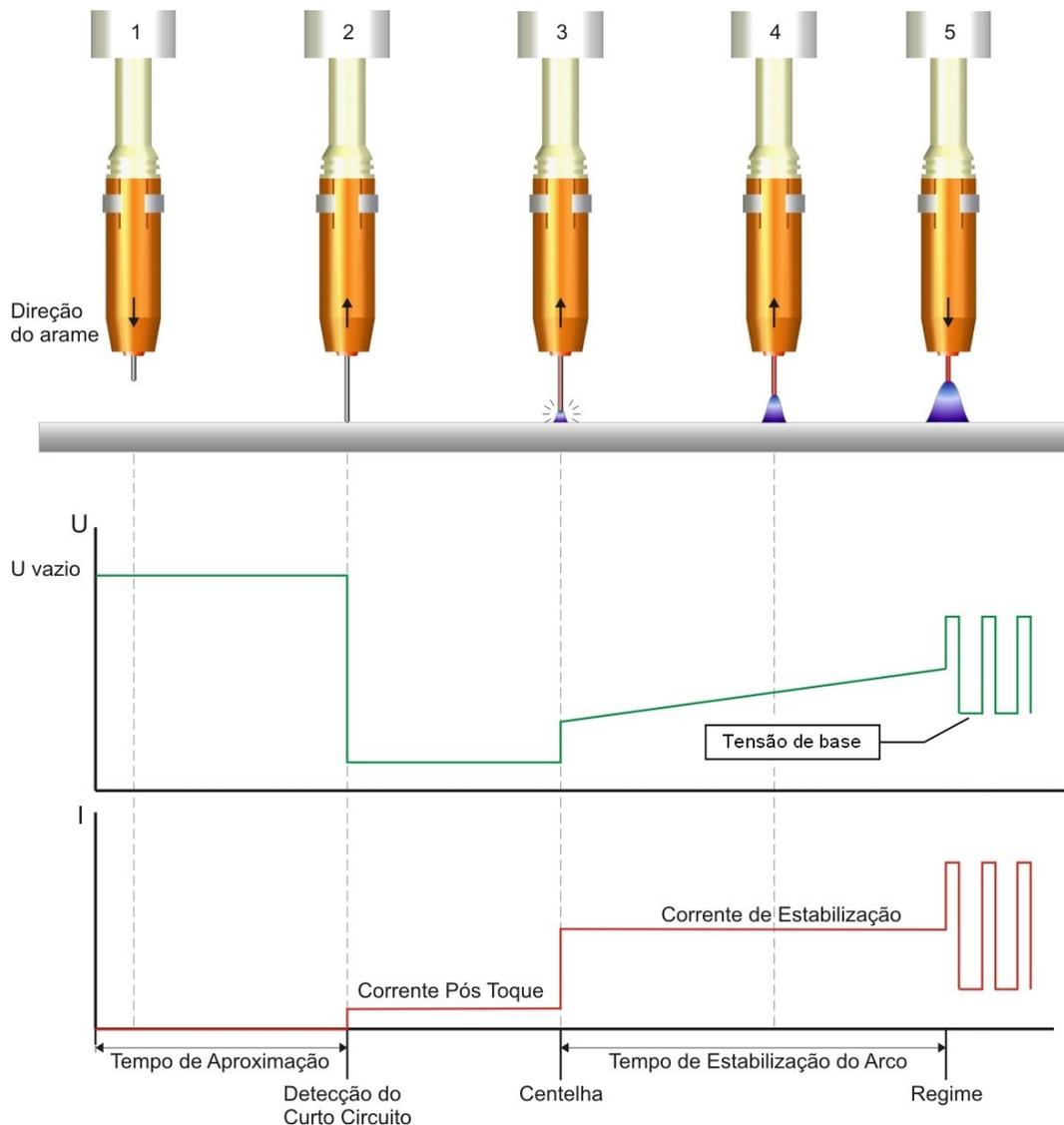


Figura 4.13 – Esquema da abertura do arco com retorno do arame

Os experimentos foram realizados com alumínio, com fonte de corrente constante, usando a rotina proposta, com monitoração da tensão, corrente e velocidade do arame, nos quais se buscou identificar a influência da geometria da ponta do arame, da corrente aplicada durante o retorno do arame, do tempo e da velocidade de retorno do arame, nas condições imediatamente após a abertura do arco. A adequada seleção destas variáveis deve permitir obter um arco estável e com comprimento adequado, evitando assim a ocorrência de curto circuito ou extinção do arco imediatamente após a abertura. Estes experimentos foram conduzidos, combinando variações dos quatro fatores em um projeto experimental fatorial (2k) conforme Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Dados para experimentos de abertura do arco com corrente baixa e retorno do arame - Alumínio

Código dos experimentos	I ret (A)	t ret (ms)	Va ret (m/min)	Geometria da Ponta
C5510	50	50	1	0 (Arredondada)
C5511	50	50	1	1 (Cortada)
C5520	50	50	2	0 (Arredondada)
C5521	50	50	2	1 (Cortada)
C1510	100	50	1	0 (Arredondada)
C1511	100	50	1	1 (Cortada)
C1520	100	50	2	0 (Arredondada)
C1521	100	50	2	1 (Cortada)
C5110	50	100	1	0 (Arredondada)
C5111	50	100	1	1 (Cortada)
C5120	50	100	2	0 (Arredondada)
C5121	50	100	2	1 (Cortada)
C1110	100	100	1	0 (Arredondada)
C1111	100	100	1	1 (Cortada)
C1120	100	100	2	0 (Arredondada)
C1121	100	100	2	1 (Cortada)

Nestes experimentos foram utilizadas chapas de alumínio 1200 H14, com espessura de 3 mm e dimensões de 100 x 180 mm, arame ER 4043 de 1,2 mm de diâmetro e gás de proteção Argônio com vazão de 15 l/min. Foi utilizada uma fonte de soldagem multiprocesso transistorizada, modelo Inversal 300 com cabeçote de alimentação especialmente construído para estes ensaios (STA20 R), equipado com circuito para controle do retorno do arame, Figura 4.14, conjugado com o controle da fonte de soldagem, ambos de fabricação da IMC. Para controle da fonte de soldagem, foi utilizado o SICA- – Sistema Integrado de Controle e Aquisição, já descrito anteriormente.

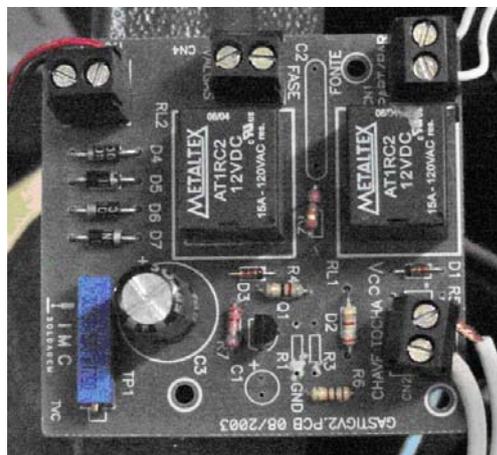


Figura 4.14 – Placa de circuito de controle do retorno do arame

A preparação da ponta do arame foi feita por dois processos, um cortando-se a ponta com alicate de corte diagonal, outro deixando a ponta arredondada como resultado aleatório após a interrupção de arco.

Foram realizadas diversas aberturas de arco em cada corpo de prova, conforme Figura 4.15, sendo mantido o espaçamento de 40 mm entre os pontos de abertura e 30 mm destes para a borda da chapa mais próxima. Os experimentos realizados consistiram na abertura do arco sem deslocamento da tocha, esta, posicionada de forma a incidir perpendicularmente o arame sobre a chapa, com distância bico de contato peça de 15 mm.



Figura 4.15 – Corpo de prova de ensaios de abertura com retorno do arame

Os oscilogramas de tensão e corrente dos ensaios foram analisados comparativamente e identificada a influência das variáveis de abertura (I_{ret} , $V_{a ret}$, t_{ret} e Geom. Ponta) sobre o comportamento do sistema proposto, sendo utilizada a tensão de base (U_b) imediatamente após o procedimento de abertura, como indicador do comprimento do arco neste instante.

4.5. Metodologia para estudo das condições operacionais para o MIG CA do Aço

Para estabelecer condições operacionais para avaliar a aplicabilidade do processo MIG CA ao reparo de dutos em operação, foram inicialmente identificadas as variáveis que permitissem a realização dos experimentos e posteriormente foram realizados os experimentos para avaliar as características térmicas e geométricas decorrentes deste processo de soldagem.

Os experimentos MIG CA do Aço foram realizados com arame ER 70S6 com diâmetro de 1,2 mm, gás de proteção com mistura de Argônio com 8 % CO_2 , vazão de 15 l/min e distância bico-peça (DBCP) de 15 mm. Para estes experimentos foi construída uma nova bancada de soldagem no Labsolda - UFSC, equipada com fonte de soldagem Inversal

450, e sistema de deslocamento de tocha denominado Tartílope V1, equipado com motor de passo, conforme figuras 4.16 e 4.17.

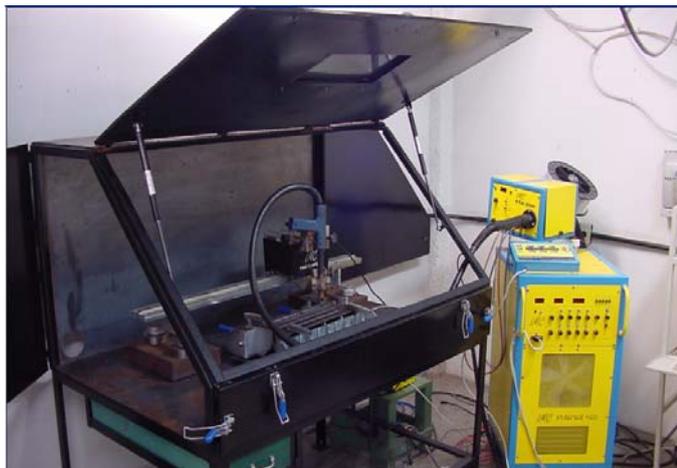


Figura 4.16 - Bancada de ensaios de soldagem MIG CA do Labsolda – UFSC



Figura 4.17 - Sistema de deslocamento de tocha (Tartílope)

O estudo para determinação das variáveis de soldagem do MIG CA para o aço consistiu inicialmente na identificação da relação entre a taxa de fusão e a corrente em cada polaridade. Os experimentos para determinar a taxa de fusão em polaridade negativa (CC) foram realizados com fonte de tensão constante, no modo MIG convencional, variando a velocidade do arame (V_a) de 1,5 a 4,5 m/min e ajustando empiricamente a tensão, até a obtenção de melhor regularidade na transferência.

Para determinar a taxa de fusão correspondente à fase com polaridade negativa, considerando que a forma de onda do MIG CA, durante esta fase, é basicamente a forma de onda do MIG Pulsado, ou seja, composta por uma base positiva e um pulso, os experimentos

para determinação da taxa de fusão em polaridade positiva, foram realizados com o processo MIG Pulsado.

Com base nos resultados foi identificada a relação entre a velocidade do arame (V_a) e a corrente média (I_m) para cada polaridade. Para determinar a taxa de fusão no MIG CA, considerando que é significativa a diferença da taxa de fusão em cada polaridade, foi proposta uma metodologia para estimar a taxa de fusão como média ponderada da taxa de fusão em cada polaridade. Para isto, foram considerados os coeficientes representativos da relação entre a velocidade do arame e a corrente, sendo expressos por K_p para a polaridade positiva e K_n para a polaridade negativa.

Considerando que, para a aplicação do processo MIG CA em aço, é suposto não ser necessária a aplicação de uma fase de base positiva, uma vez que não há necessidade de promover limpeza catódica, como no caso do alumínio, foi proposto inicialmente o uso da forma de onda semelhante ao processo MIG Pulsado, sendo a corrente da fase de base deslocada para a polaridade negativa, ou seja, basicamente uma corrente alternada de onda retangular, conforme Figura 4.18.

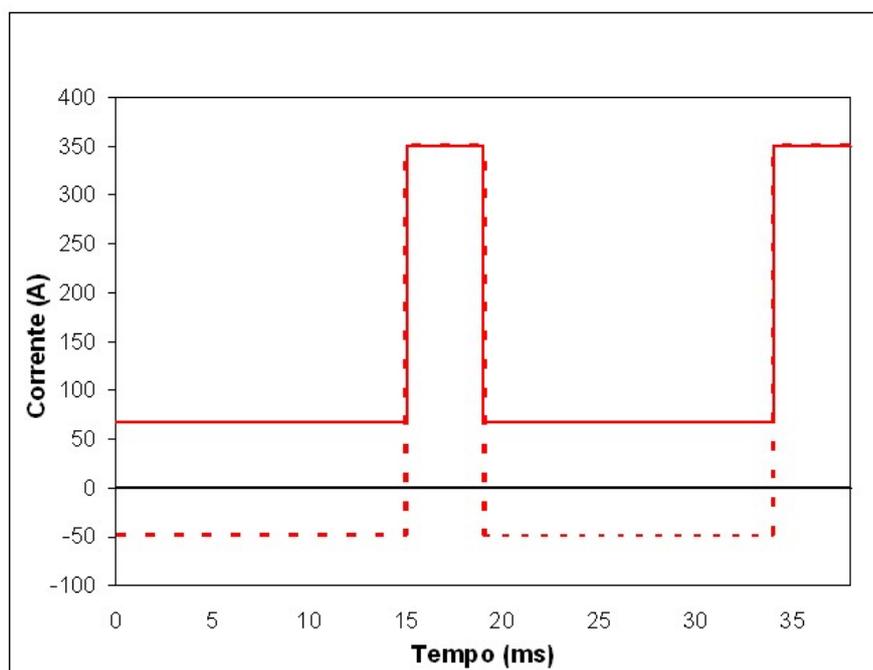


Figura 4.18 - Forma de onda MIG Pulsado CC^+ e CA

Para avaliar a adequação da metodologia proposta, utilizando as variáveis calculadas com base na média ponderada da taxa de fusão em cada polaridade, foram realizados os ensaios com as variáveis apresentados na Tabela 4.7. Nestes experimentos foi ajustada progressivamente a amplitude da corrente na fase negativa até ser estabelecido o equilíbrio da taxa de fusão e velocidade de alimentação do arame, ou seja, para obter o comprimento do

arco adequado, foi alterada unicamente a corrente da fase negativa, não alterando a velocidade do arame e as variáveis envolvidas na fase positiva.

Tabela 4.7– Experimentos MIG CA com forma de onda da Figura 4.18

Código do experimento	Va (m/min)	Vs (cm/min)	dg (mm)	Ip (A)	tp (ms)	tn (ms)	Im(r) (A)	In est (A) Kn* =0,038
ACR2130	2,1	42	1,37	350	4	30	70,3	30,6
ACR3020	3,0	60	1,37	350	4	20	102,5	45,9
ACR3815	3,8	76	1,37	350	4	15	131,3	61,2
ACR4512	4,5	90	1,37	350	4	12	158,0	76,5
ACR5110	5,1	102	1,37	350	4	10	177,1	91,8
ACR6008	6,0	120	1,37	350	4	8	209,3	114,8

Em uma avaliação mais ampla, considerando que os percentuais de polaridade negativa podem ser variados para produzir diferentes penetrações, mediante o uso da forma de onda de corrente típica do processo MIG CA, conforme modelo apresentado na Figura 2.13, que envolve três fases: Pulso positivo, Base negativa e Base positiva, identificou-se a necessidade de validar a proposta metodológica para esta condição mais abrangente. Neste sentido, foram realizados os experimentos com três diferentes percentuais de tempo em polaridade negativa (30, 50 e 70%), onde foram utilizadas as variáveis calculadas com base nos resultados obtidos a partir da metodologia proposta, conforme Tabela 4.8. Nestes experimentos foi avaliado se a taxa de fusão correspondia à de alimentação, ou seja, se a metodologia era aplicável.

Tabela 4.8 - Experimentos MIG CA com forma de onda da Figura 2.13

Código do experimento	% EN	Va (m/min)	Vs (cm/min)	T (ms)	Ip (A)	tp (ms)	In (A)	tn (ms)	Ib (A)	tb (ms)	Im (r) (A)
AC3030	30	3,0	60	24	350	4	51	7,2	70	12,8	111
AC5030	50	3,0	60	24	350	4	51	12	74	8	108
AC7030	70	3,0	60	24	350	4	51	16,8	93	3,2	106

Para avaliar qualitativamente a viabilidade de uso da forma de onda de corrente alternada retangular apresentada na Figura 4.18, sem base positiva, foram realizados depósitos sobre chapa, conforme Tabela 4.9, utilizando esta forma de onda, e outros depósitos com o processo MIG-Pulsado (CC⁺), considerado como referência qualitativa. Para auxiliar a avaliação qualitativa, estes ensaios foram realizados com deposição de cordões de cada processo, lado a lado, sobre a mesma chapa, e efetuadas metalografias para verificar a geometria da solda. Nestes experimentos foi mantido constante o volume depositado (Vs/Va constante).

Tabela 4.9 - Experimentos MIG CA e CC com forma de onda da Figura 4.18

Código do experimento	Va (m/min)	Vs (cm/min)	dg (mm)	Ip (A)	tp (ms)	tb ou tn (ms)	Im(r) (A)	Ib ou In (A)
CC2522	2,5	50	1,33	350	4	22	100	55
ACR2916	2,9	58	1,29	350	4	16	100	-39

4.6. Metodologia para estudo da relação entre penetração, temperatura e tempo em polaridade negativa para o aço

Para avaliar a relação entre o percentual de tempo em polaridade negativa (%EN), a penetração e a temperatura para o aço, foram realizados experimentos conforme Tabela 4.10, de forma a permitir avaliar a influência da espessura da chapa, e do percentual de tempo em polaridade negativa (%EN) sobre a penetração e temperatura, mantendo-se constante o volume depositado.

Tabela 4.10 - Conjunto de experimentos para avaliar a influência do % EN e espessura na penetração e temperatura

Código do experimento	%EN	Va (m/min)	e (mm)	Vs (cm/min)	Ip (A)	tp (ms)	In (A)	tn (ms)	Ib (A)	tb (ms)
AC0034	0	2,7	4,7	54	300	4	0	0	78	20
AC3034	30	2,7	4,7	54	300	4	60	7	80	13
AC5034	50	2,7	4,7	54	300	4	60	12	84	8
AC7034	70	2,7	4,7	54	300	4	60	17	101	3
AC0033	0	2,7	3,2	54	300	4	0	0	78	20
AC3033	30	2,7	3,2	54	300	4	60	7	80	13
AC5033	50	2,7	3,2	54	300	4	60	12	84	8
AC7032	70	2,7	3,2	54	300	4	60	17	101	3
AC0032	0	2,7	2	54	300	4	0	0	78	20
AC3032	30	2,7	2	54	300	4	60	7	80	13
AC5032	50	2,7	2	54	300	4	60	12	84	8
AC7032	70	2,7	2	54	300	4	60	17	101	3

Estes experimentos foram realizados com deposição de cordão sobre chapa de aço carbono 1010 – 1020, laminada a quente, com dimensões de 400 x 160 mm, sendo depositados em cada corpo de prova dois cordões de solda, com espaçamento de 40 mm entre eles e 60 mm de afastamento da borda lateral, conforme esquema apresentado na Figura 4.19, visando minimizar a deformação no corpo de prova e preservar o ajuste da distância bico-peça (DBCP) de 15 mm.

Para cada par de %EN x espessura de chapa (e), foi verificada, durante a soldagem, a temperatura máxima atingida no verso da chapa. Para monitorar a temperatura foram instalados dois termopares tipo K 2x24 AWG, com espaçamento de 100 mm entre eles, em

alinhamento com o cordão, utilizando sistema de monitoração de temperatura AQ-USB, conforme figuras 4.19, 4.20 e 4.21.

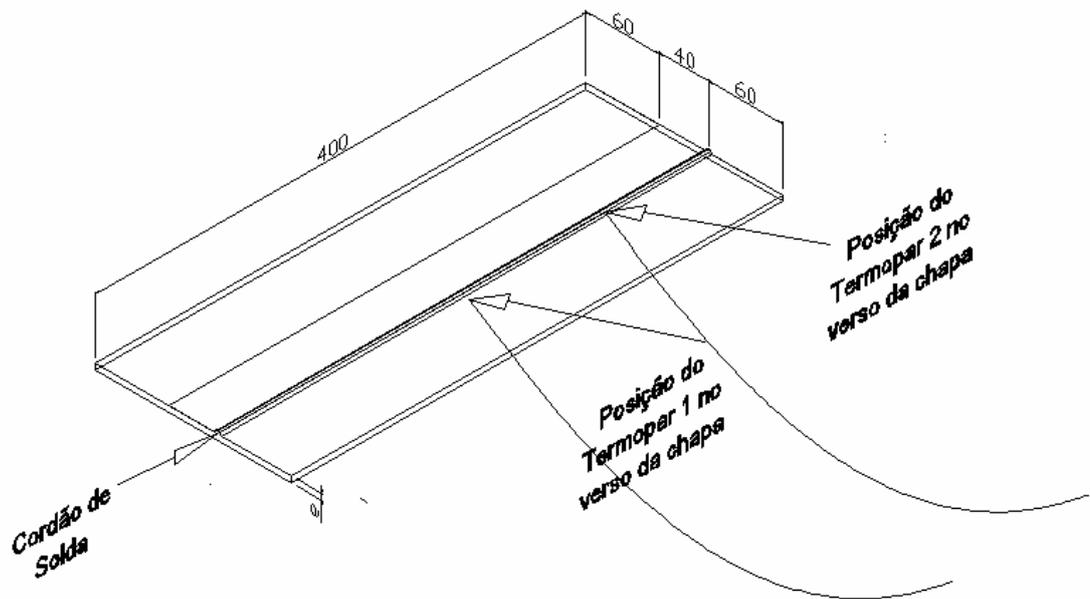


Figura 4.19 - Esquema do posicionamento dos termopares no corpo de prova



Figura 4.20 - Termopares instalados no verso da chapa



Figura 4.21 - Sistema de monitoração de temperatura

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Relação entre tensão, corrente e comprimento de arco para o alumínio.

O resultado do primeiro conjunto de experimentos, realizados com forma de onda de corrente com os 5 (cinco) intervalos distintos, incluindo um patamar de corrente entre a base e o pulso, está apresentado na Tabela 5.1. A representação gráfica destes resultados está apresentada nas figuras 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1 - Média e desvio padrão da tensão em cada intervalo e comprimento de arco

Código do Experimento	Comprimento do arco (mm)	Intervalo	Corrente no intervalo (A)	Tensão média no intervalo (V)	Desvio Padrão da tensão no intervalo (V)
PAT03	3	1	20	15,2	1,2
PAT03	3	2	100	16,9	0,6
PAT03	3	3	170	16,4	6,1
PAT03	3	4	100	14,1	8,6
PAT03	3	5	-20	-13,7	1,9
PAT06	6	1	20	16,0	0,7
PAT06	6	2	100	17,0	0,7
PAT06	6	3	170	19,4	0,7
PAT06	6	4	100	18,7	1,3
PAT06	6	5	-20	-14,9	1,8
PAT09	9	1	20	17,3	0,6
PAT09	9	2	100	18,8	0,5
PAT09	9	3	170	21,3	0,9
PAT09	9	4	100	19,5	3,8
PAT09	9	5	-20	-16,2	2,2
PAT12	12	1	20	18,9	0,5
PAT12	12	2	100	20,3	0,7
PAT12	12	3	170	22,8	1,0
PAT12	12	4	100	21,0	3,1
PAT12	12	5	-20	-18,4	2,5

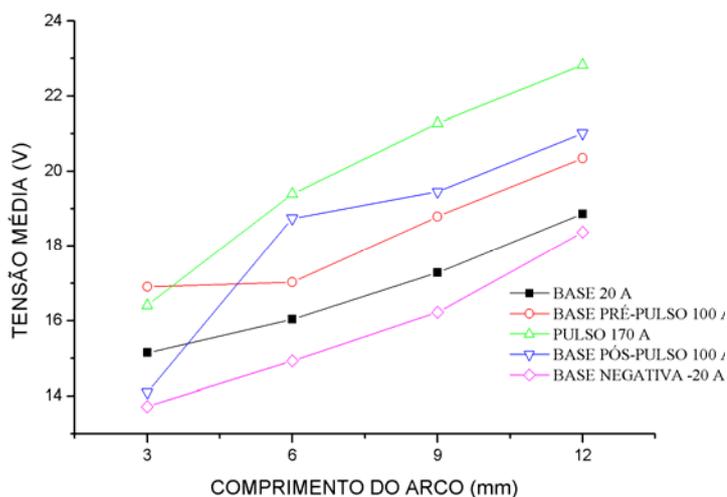


Figura 5.1 - Tensão média em cada intervalo e comprimento de arco.

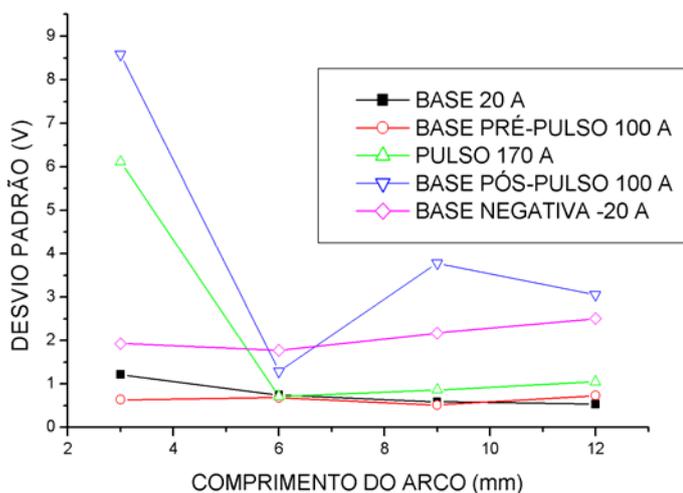


Figura 5.2 - Desvio padrão da tensão em cada intervalo e comprimento de arco.

Os resultados para cada comprimento de arco, foram obtidos nos mesmos ensaios, apenas em intervalos distintos. Neste sentido parece significativo considerar que para condições de arco curto, foi verificado um comportamento diferenciado para os intervalos com maiores níveis de corrente. Este comportamento parece estar associado à dificuldade para estabelecer a conexão catódica para arcos muito curtos, citada por Modenesi (1994).

Os resultados indicam que a tensão na base positiva apresentou, simultaneamente, boa linearidade em relação ao comprimento do arco e reduzido desvio padrão, sendo considerada, a princípio, como mais adequada para referenciar o comprimento do arco. A relação entre a tensão de base e o comprimento do arco, para uma corrente de base de 20 A, pode ser expressa pela equação 5.1.

$$U_b = 0,412 \times a + 13,744 \quad (R^2=0,9851) \quad (5.1)$$

Onde "a" é o comprimento de arco.

5.2. Controle do comprimento de arco para o alumínio

O controle do comprimento de arco proposto, baseado em modulação da amplitude da corrente de base, foi avaliado com base na estabilidade da tensão. As leituras de tensão e corrente obtidos dos oscilogramas dos experimentos realizados, foram analisadas, sendo utilizada a média e o desvio padrão da tensão de base como indicadores da estabilidade do comprimento do arco, conforme Tabela 5.2 e figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6.

Tabela 5.2 - Resultado dos experimentos para avaliação do controle baseado em modulação da amplitude da corrente de base

CÓDIGO	Inclinação	Controle	Tensão média na base (V)	Desvio Padrão da Tensão na base (V)
SRCC1	0°	COM CONTROLE	18,8	0,77
SRCC2	0°	COM CONTROLE	18,7	0,85
RDSC1	-30°	SEM CONTROLE	19,6	1,40
RDSC2	-30°	SEM CONTROLE	20,0	1,55
RSSC1	30°	SEM CONTROLE	21,3	1,69
RSSC2	30°	SEM CONTROLE	20,5	1,48
RDCC1	-30°	COM CONTROLE	18,8	0,66
RDCC2	-30°	COM CONTROLE	18,7	0,87
RSCC1	30°	COM CONTROLE	18,8	0,70
RSCC2	30°	COM CONTROLE	18,8	0,67

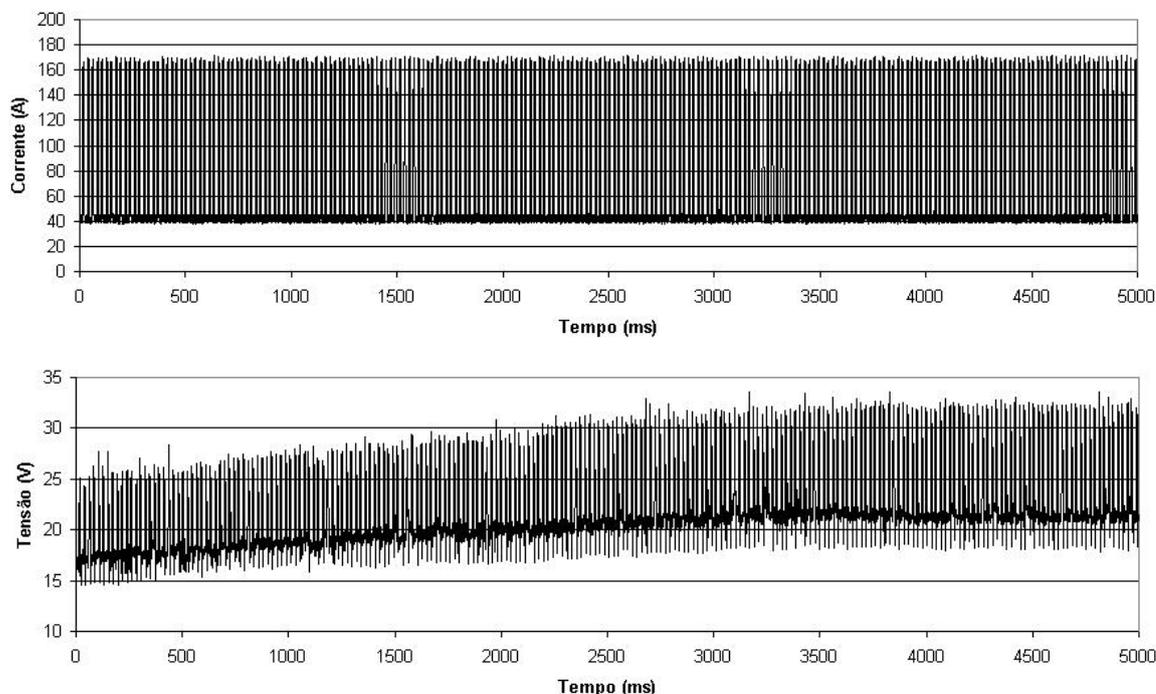


Figura 5.3 - Oscilogramas de corrente e tensão correspondentes aos experimentos RDSC (inclinação de -30°, sem controle).

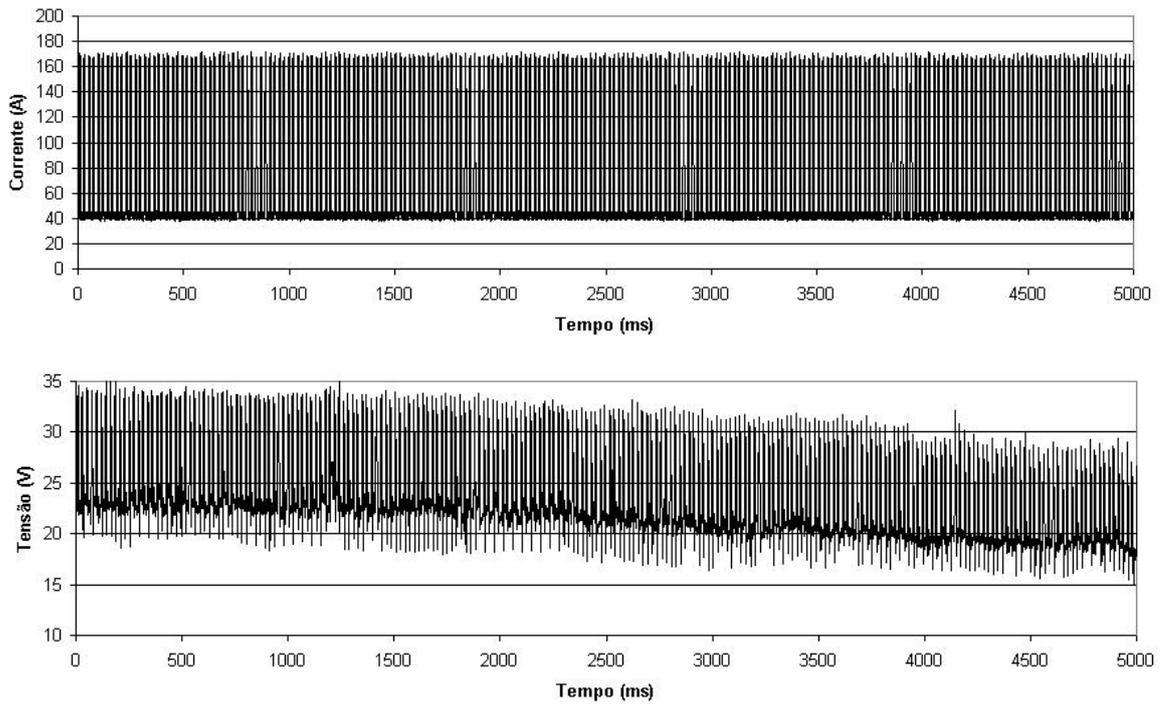


Figura 5.4 - Oscilogramas de corrente e tensão correspondentes aos experimentos RSSC (inclinação de $+30^\circ$, sem controle).

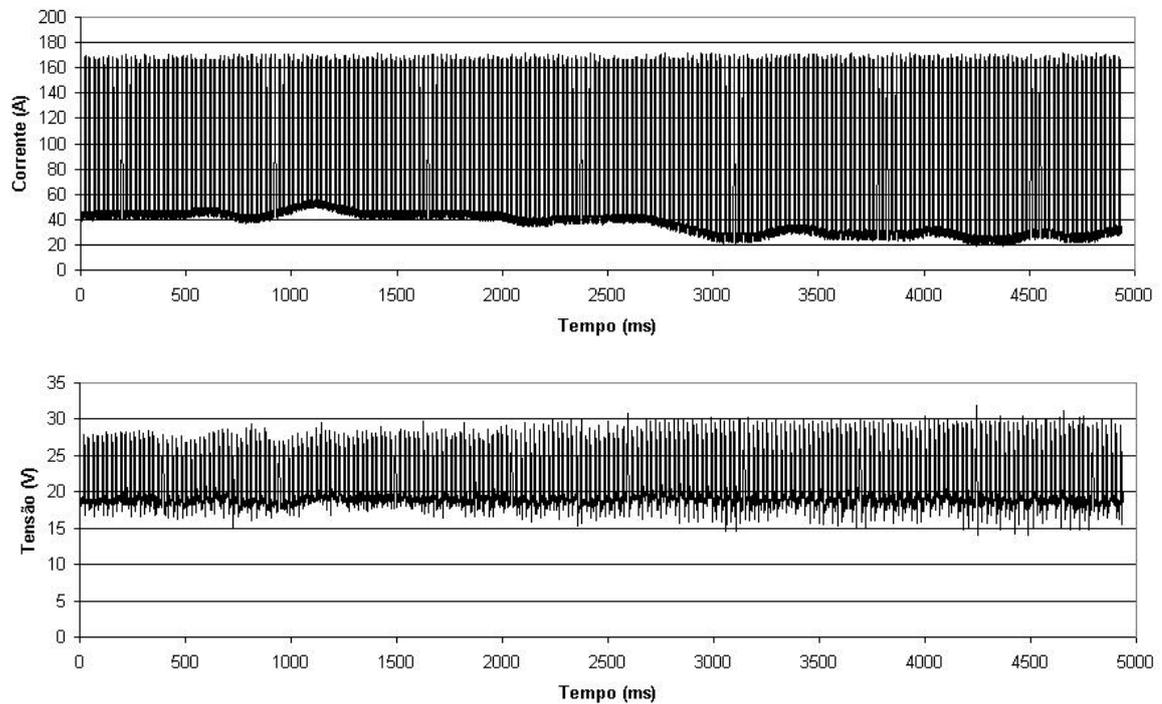


Figura 5.5 - Oscilogramas de corrente e tensão correspondentes aos experimentos RDCC (inclinação de -30° , com controle)

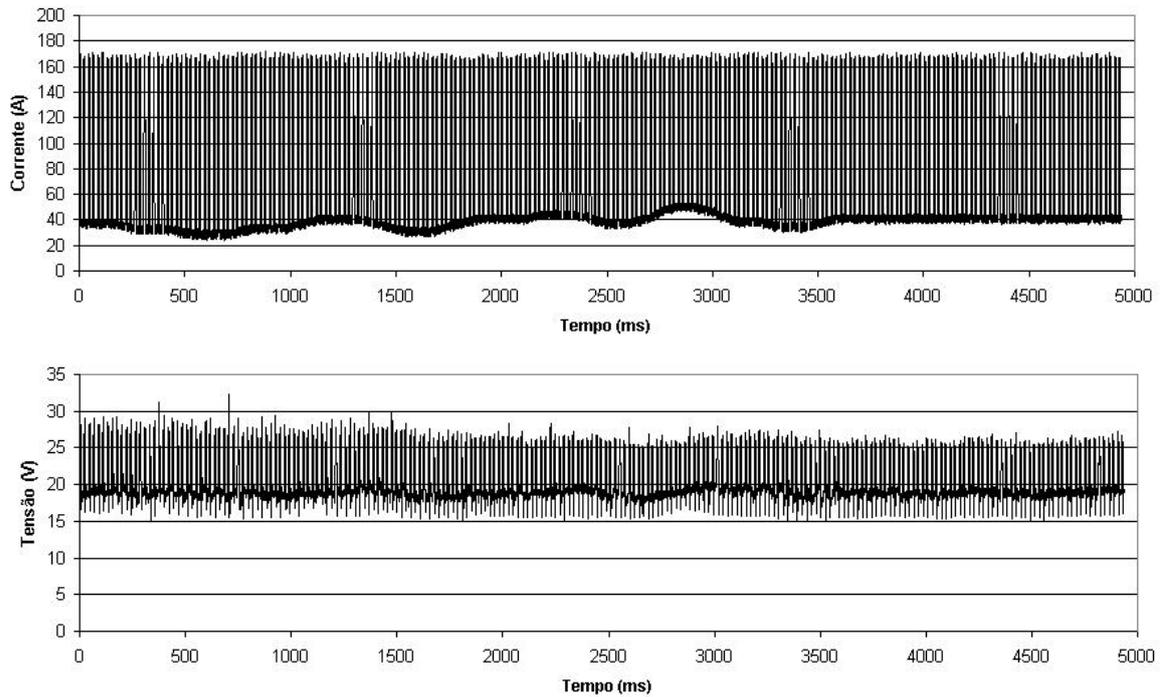


Figura 5.6 - Oscilogramas de corrente e tensão correspondentes aos experimentos RDSC (inclinação de +30o, com controle).

Os resultados indicam que o controle proposto foi capaz de manter uma razoável estabilidade da tensão de base, que permaneceu em torno de 18,8 V e com uma redução de 50% no desvio padrão da tensão de base, conforme Figura 5.7 (a) e (b). Nos ensaios com sistema de controle, foi observado que tanto a tensão média como o desvio padrão não foram significativamente influenciados pela variação da distância bico-peça, mantendo os mesmos níveis independentemente da distância bico-peça.

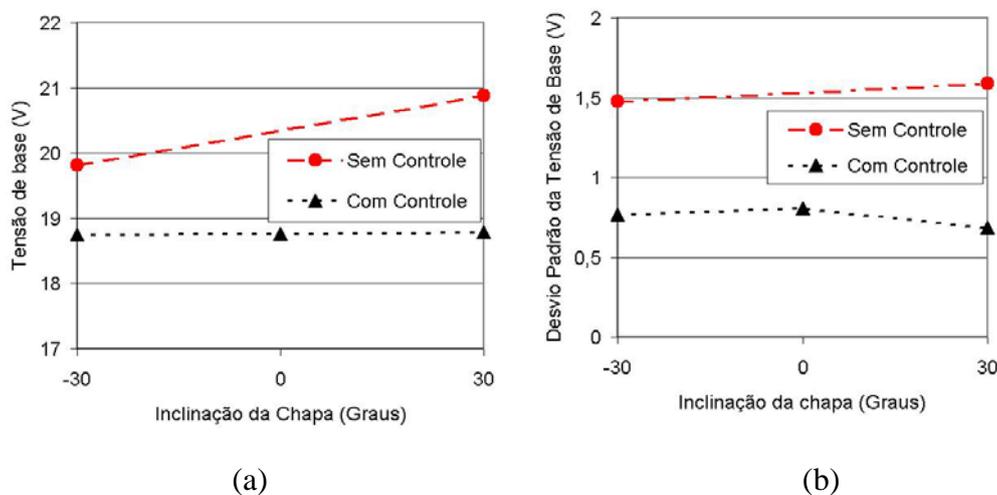


Figura 5.7 - Comportamento da tensão de base (a) e do desvio padrão (b) com variação da DBCP

Apesar do sistema proposto permitir uma razoável estabilidade do comprimento do arco, deve-se considerar que resultou em significativas variações da corrente média, que oscilou em torno de 60 a 80 A, ou seja, considerando que a tensão foi mantida estável, houve uma variação de aproximadamente 28% na energia de soldagem. Para as aplicações do processo MIG CA, onde a variação da energia de soldagem pode comprometer o processo e até mesmo a segurança, tais como na soldagem de chapas finas ou na soldagem de dutos em operação, os resultados indicam restrições quanto à aplicação da técnica proposta.

5.3. Relação entre tensão de base, corrente de base e comprimento de arco - alumínio

Para identificar a relação entre a tensão de base, a corrente de base e o comprimento de arco para o alumínio, visando aprimorar o sistema de controle de comprimento de arco, foram realizados os experimentos especificados na Tabela 4.5, com dois fatores e quatro níveis, sendo quatro amplitudes de corrente de base e quatro comprimentos de arco. Os oscilogramas de tensão e corrente forneceram as leituras para cada nível de corrente, conforme Figura 5.8 (a) e (b).

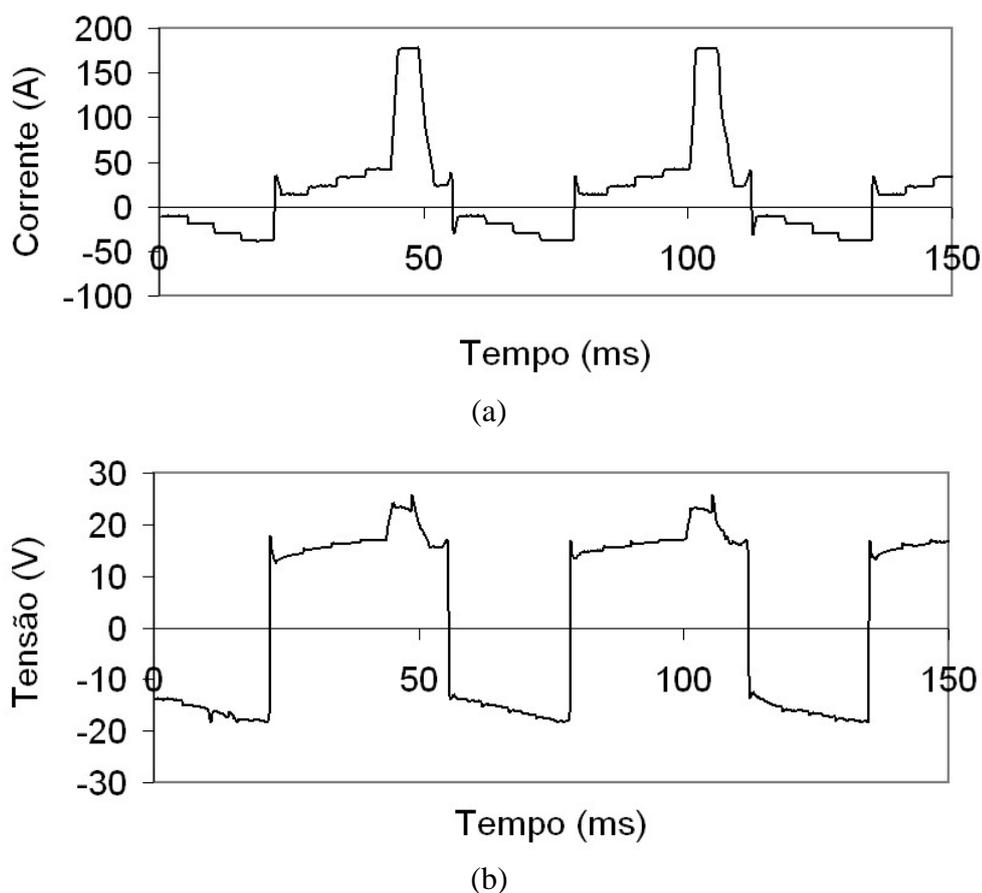


Figura 5.8 - Oscilogramas de Corrente e de Tensão com onda escalonada para comprimento de arco de 6 mm

Com base nos dados coletados neste conjunto de experimentos com forma de onda escalonada, foi identificada a relação entre a tensão e a corrente de base para cada comprimento de arco, conforme figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12.

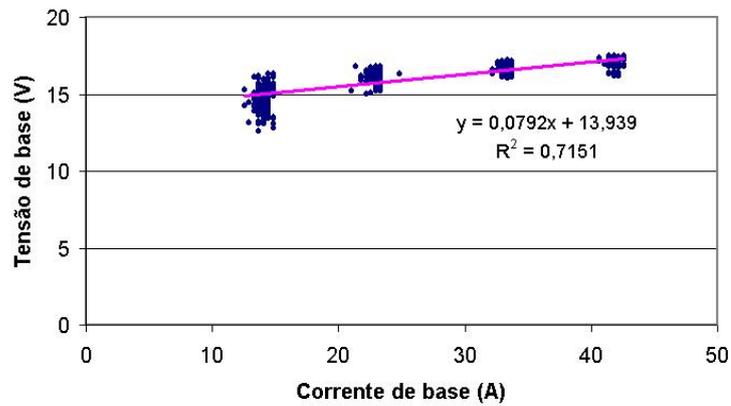


Figura 5.9 - Tensão de base para comprimento de arco de 6 mm

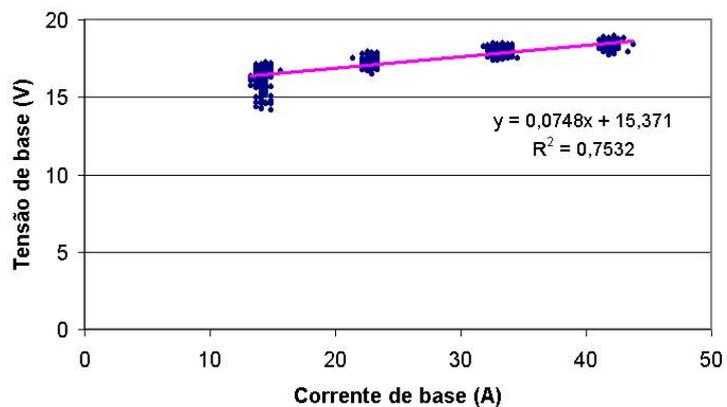


Figura 5.10 - Tensão de base para comprimento de arco de 8 mm

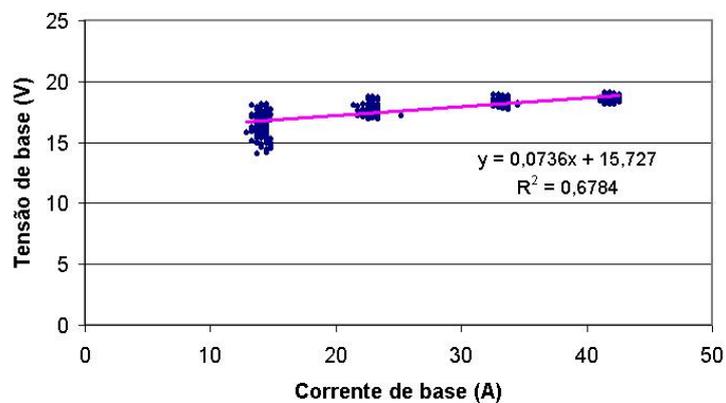


Figura 5.11 - Tensão de base para comprimento de arco de 10 mm

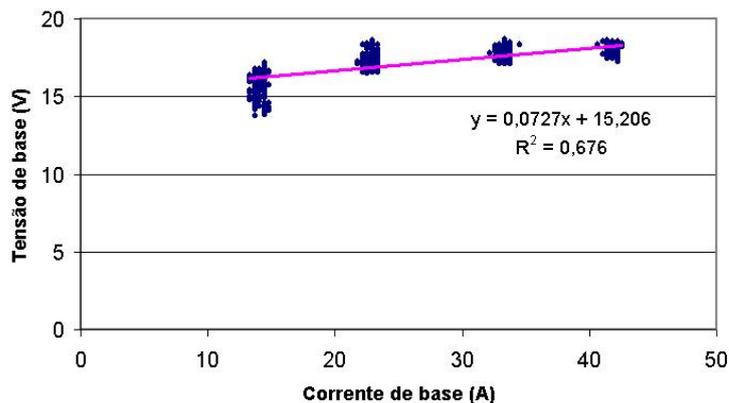


Figura 5.12 - Tensão de base para comprimento de arco de 12 mm

Para verificar estatisticamente a influência dos fatores estudados, bem como de suas interações, foi realizada a análise das variâncias, aplicando-se o teste estatístico F (Fischer). Na realização deste teste, foi utilizado o software Statistica, versão 7.1, que forneceu os resultados apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - ANOVA Tensão de base - U_b (V)

Fatores	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de liberdade (gl)	Quadrado Médio (QM)	Razão F	Probabilidade de erro do tipo I (p)
Corrente de base	2456	3	819	3776	0,000000
Comprimento do arco	1334	3	445	2051	0,000000
Corrente de base & Comprimento do arco	6	9	1	3	0,000614
Erro amostral	770	3550	0		

Deve-se observar que o nível de significância (p) indicado no teste, reflete a probabilidade de erro de tipo I, ou seja, é a probabilidade de se considerar que o fator estudado tem influência sobre o item observado, sendo isto falso. Desta forma, conforme Anova, se pode concluir que os dois fatores, corrente de base e comprimento do arco, e a interação destes, influenciam a tensão de base (U_b).

Considerando todo o conjunto de experimentos, foi identificada a superfície de resposta apresentada na Figura 5.13, e a respectiva equação para indicar a tensão em função da corrente de base e do comprimento de arco.

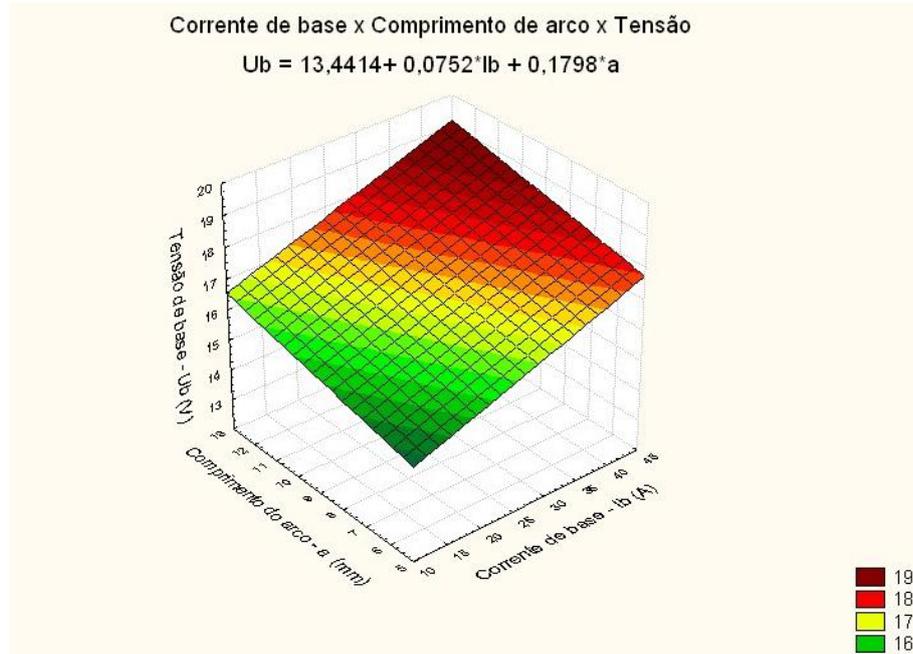


Figura 5.13 - Superfície de resposta da Tensão em função da Corrente de base (I_b) e do comprimento do arco (a)

Para verificar a validade da relação identificada, expressa pela equação identificada na Figura 5.13, transcrita na equação 5.2, foram realizados experimentos, nos quais foi utilizada a forma de onda de corrente típica para o MIG CA do alumínio, Figura 2.13. Estes experimentos resultaram em tensão de base acima da estimada, conforme Figura 5.14.

$$U_b = 13,4 + 0,08 \cdot I_b + 0,18 \cdot a \quad (5.2)$$

Onde: “ I_b ” é a corrente de base e “ a ” é o comprimento de arco.

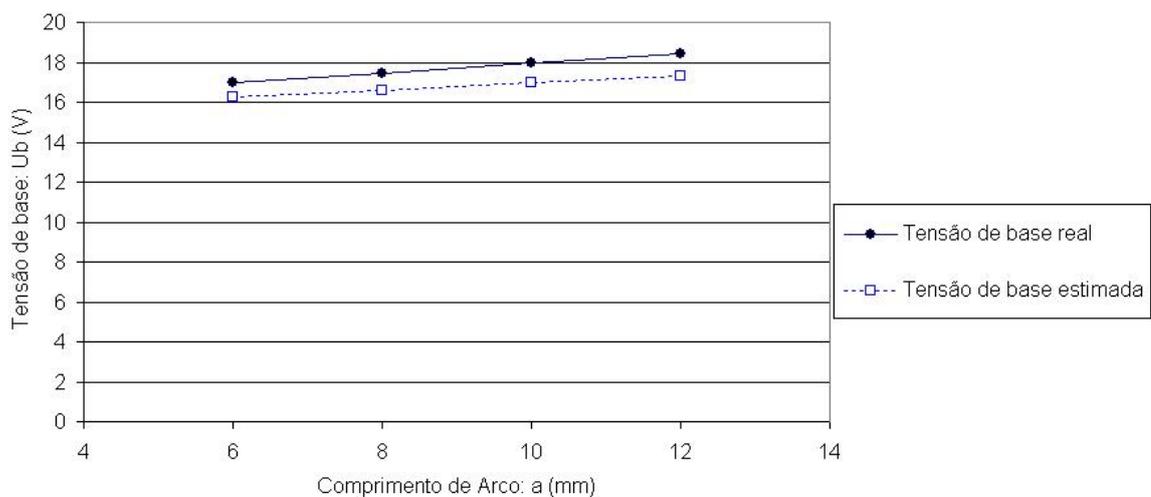


Figura 5.14 - Gráfico comparativo entre Tensão de base: estimada e real ($I_b = 23$ A)

Tendo sido verificada a ocorrência de uma tensão média em torno de 1 V acima da estimada, foi efetuada uma análise do oscilograma de tensão destes experimentos. Nesta análise foi verificada a existência de uma significativa rampa de tensão, conforme Figura 5.15, provavelmente em virtude da progressão do processo de limpeza catódica.

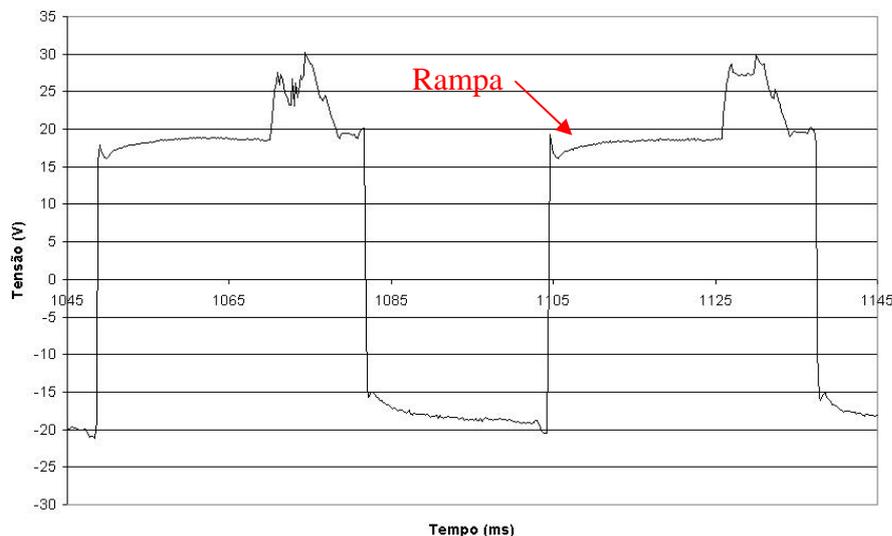


Figura 5.15 - Rampa de tensão após mudança de polaridade

A rampa de tensão observada é provavelmente a causa da maior dispersão dos pontos correspondentes ao primeiro intervalo após a mudança de polaridade (corrente de 14 A) observada nas figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12. Desta forma, a diferença entre a tensão percebida e a estimada, pode ser atribuída à utilização, nestes experimentos, de uma fase de base positiva com maior duração, resultando em uma tensão média mais elevada. A existência da rampa de tensão após mudança da polaridade deve ser considerada para a construção de sistema automático de controle de comprimento do arco, por representar uma variação de tensão sem de fato haver uma variação de comprimento de arco, o que pode induzir a erros.

5.4. Abertura do arco com retorno do arame para o alumínio.

Os experimentos de abertura do arco realizados com a técnica de retorno do arame resultaram em um conjunto de oscilogramas de tensão e corrente que permitiram a avaliação da técnica e das variáveis utilizadas.

Os oscilogramas de corrente e tensão, apresentados nas figuras 5.16, 5.17, 5.18 e 5.19, permitem fazer uma análise qualitativa sobre a influência das variáveis (I_{ret} , $V_{a ret}$, t_{ret} e Geom. Ponta) sobre o comportamento do sistema proposto, sendo utilizada a tensão de base (U_b), imediatamente após a abertura, para indicar o comprimento do arco neste instante.

Em experimentos com diferentes tempos de retorno do arame-eletrodo (t_{ret}), 50 ms (Figura 5.16-a) e 100 ms (Figura 5.16-b), verificou-se que os experimentos com maior tempo de retorno resultaram em maiores níveis de tensão de base (U_b) após a abertura, resultando em que o arco ficasse mais próximo do bico de contato e o regime permanente (corrente pulsada) se iniciasse com um maior comprimento de arco.

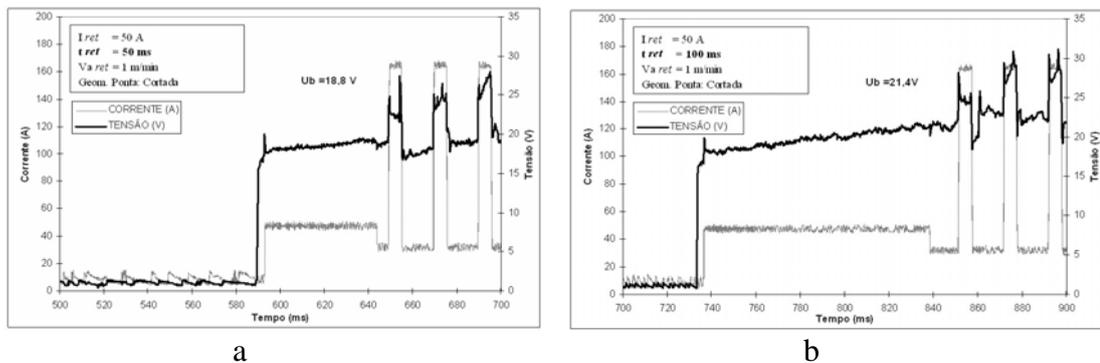


Figura 5.16 - Oscilogramas de corrente e tensão - Tempo em retorno: (a) $t_{ret} = 50$ ms ; (b) $t_{ret} = 100$ ms

Efeito similar ao aumento do tempo de retorno do arame (t_{ret}) se observou em experimentos com diferentes níveis de corrente de retorno (I_{ret}), 50 A (Figura 5.17-a) e 100 A (Figura 5.17-b), sendo identificada maior tensão de base (U_b) para condições de maior nível de corrente de retorno, correspondendo ao aumento da taxa de fusão provocada pela corrente mais elevada durante o período de retorno do arame.

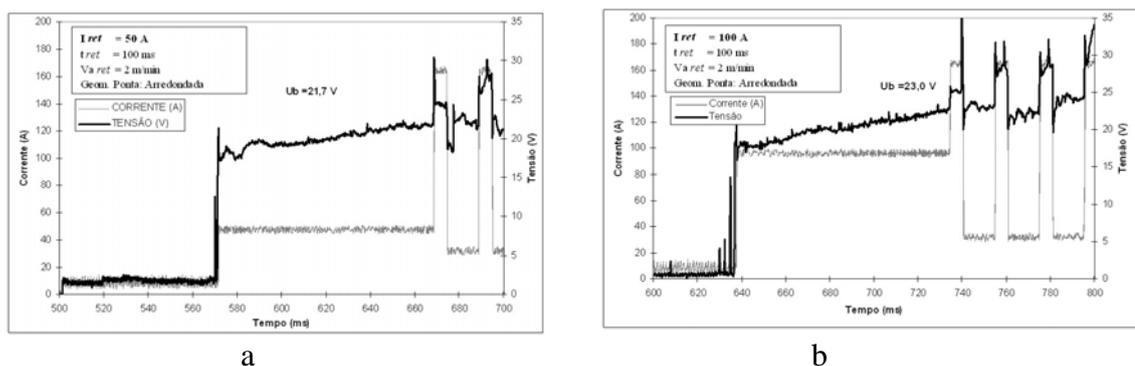


Figura 5.17 - Oscilogramas de corrente e tensão - Corrente em retorno: (a) $I_{ret} = 50$ A ; (b) $I_{ret} = 100$ A

Nos experimentos com diferentes velocidades de arame no retorno ($V_{a ret}$), 1 m/min (Figura 5.18-a) e 2 m/min (Figura 5.18-b), verificou-se um pequeno aumento da tensão de base (U_b) indicando uma menor influência deste fator quando comparada à influência do tempo de retorno ou da corrente de retorno. A reduzida influência da velocidade de retorno na

tensão de base (U_b), é decorrente, provavelmente, da inércia existente no sistema de alimentação de arame.

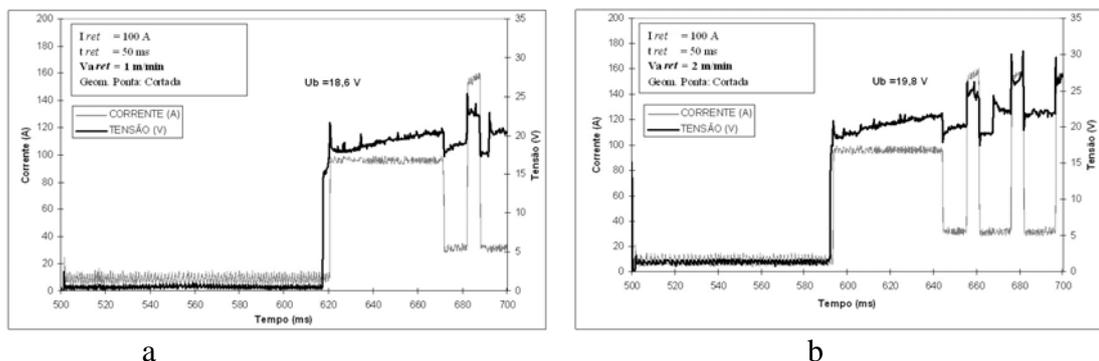


Figura 5.18 - Oscilogramas de corrente e tensão – Velocidade do arame em retorno: (a) $V_{a\text{ ret}} = 1 \text{ m/min}$; (b) $V_{a\text{ ret}} = 2 \text{ m/min}$

Na análise realizada sobre os oscilogramas correspondentes à variação apenas da geometria da ponta do arame, arredondada (Figura 5.19-a) ou cortada (Figura 5.19-b), observou-se que este fator não influenciou de forma significativa nos experimentos. A abertura do arco realizada de forma suave fez com que ambas às geometrias de ponta (arredondada e cortada) apresentassem resultados muito semelhantes na tensão de base após a abertura (U_b), o que indica uma robustez do sistema proposto e suas vantagens perante a abertura convencional.

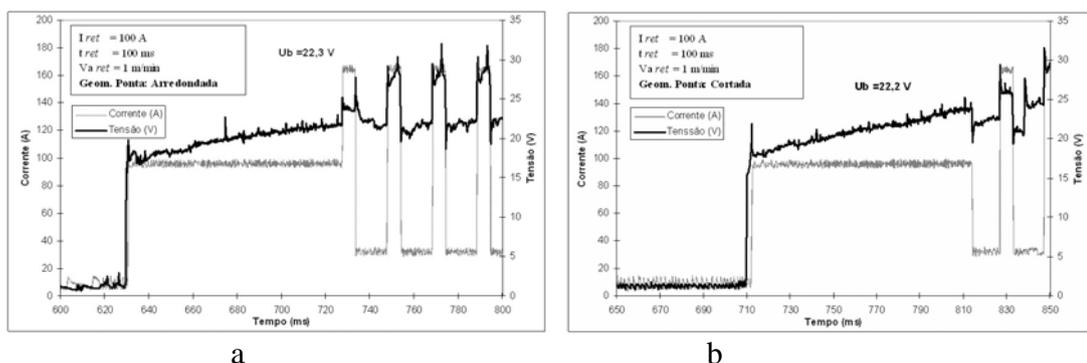


Figura 5.19 - Oscilogramas de corrente e tensão - Influência da geometria da ponta do arame-eletrodo: (a) Ponta arredondada; (b) Ponta cortada

O conjunto de experimentos, projetado com quatro fatores (corrente, tempo, velocidade de retorno e geometria da ponta) e dois níveis, forneceu os resultados conforme Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Tensão de base após a abertura do arco e energia demandada

Código dos experimentos	I ret (A)	t ret (ms)	Va ret (m/min)	Geometria da Ponta	Tensão de base (V)	Energia na abertura (J)
C5510	50	50	1	0 (Arredondada)	15,5	61
C5511	50	50	1	1 (Cortada)	18,8	45
C5520	50	50	2	0 (Arredondada)	18,2	39
C5521	50	50	2	1 (Cortada)	19,2	44
C1510	100	50	1	0 (Arredondada)	16,7	27
C1511	100	50	1	1 (Cortada)	18,6	93
C1520	100	50	2	0 (Arredondada)	20,4	102
C1521	100	50	2	1 (Cortada)	19,8	98
C5110	50	100	1	0 (Arredondada)	19,9	88
C5111	50	100	1	1 (Cortada)	21,4	95
C5120	50	100	2	0 (Arredondada)	21,7	92
C5121	50	100	2	1 (Cortada)	22,2	97
C1110	100	100	1	0 (Arredondada)	22,3	183
C1111	100	100	1	1 (Cortada)	22,2	204
C1120	100	100	2	0 (Arredondada)	23,0	187
C1121	100	100	2	1 (Cortada)	21,9	205

Utilizando a tensão de base após a abertura do arco como indicador do comprimento do arco, verificou-se que a influência do tempo em que o arame permanece em movimento de retorno, sobre a tensão do arco após a abertura é afetada pela velocidade de retorno, conforme Figura 5.20, o que, provavelmente, é decorrente da existência de rampa de aceleração do sistema de alimentação de arame.

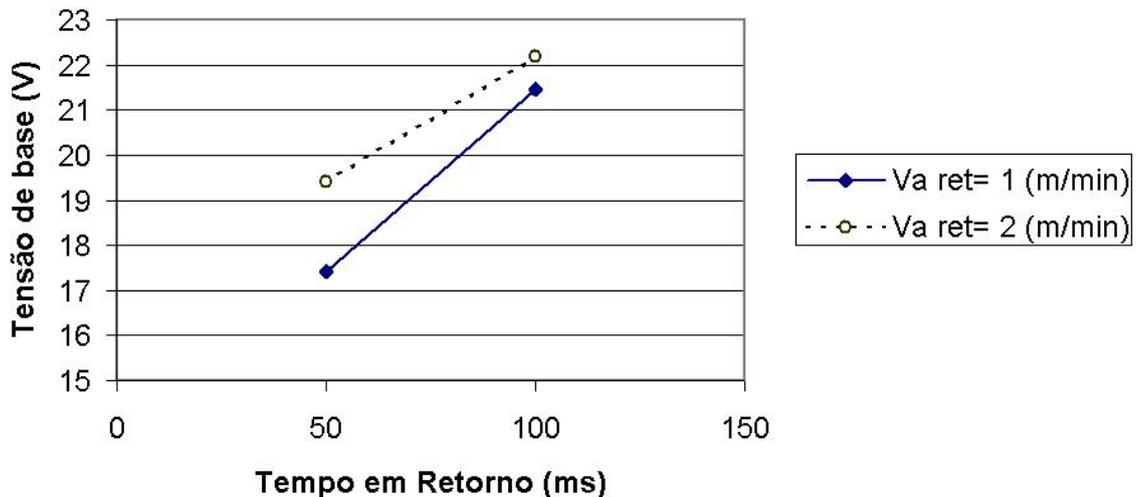


Figura 5.20 - Influência da velocidade de retorno e do tempo em retorno sobre a tensão de base

A influência do tempo em retorno e do nível de corrente aplicada, sobre a tensão do arco após a abertura estão apresentadas na Figura 5.21.

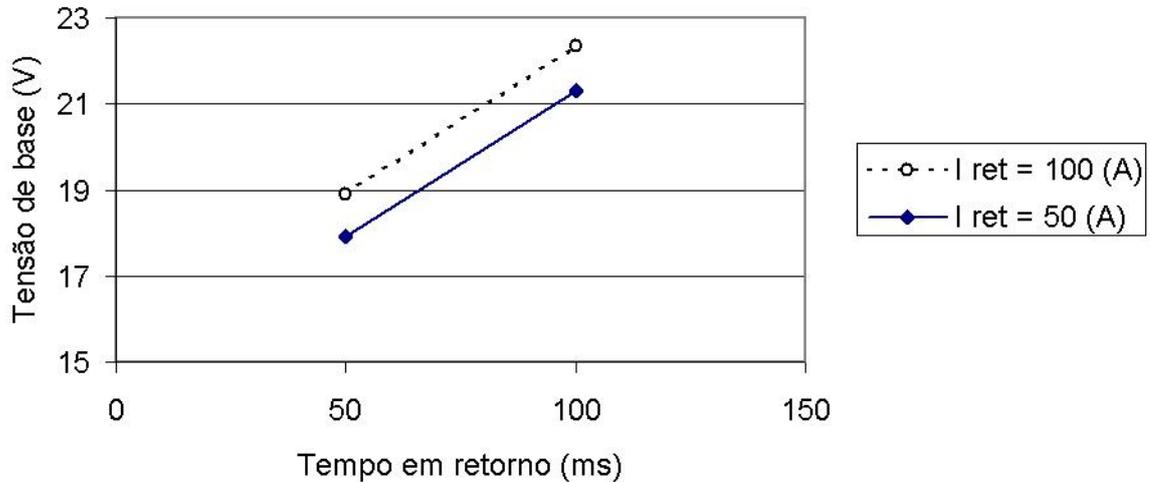


Figura 5.21 - Influência da corrente em retorno e do tempo em retorno sobre a tensão de base

A influência do tempo em retorno e da corrente de abertura, sobre a energia demandada até a abertura, está apresentada na Figura 5.22, onde se verifica o aumento da energia em decorrência do aumento do tempo e do nível de corrente.

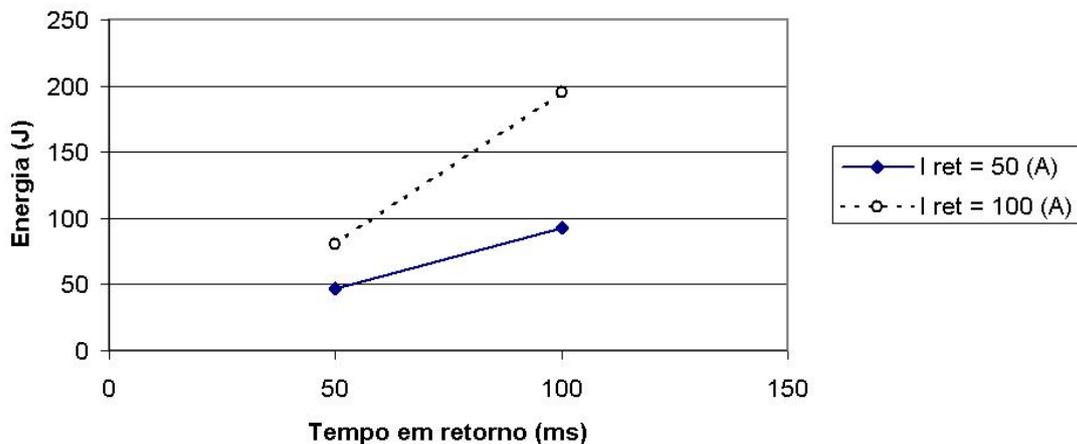


Figura 5.22 - Influência da Corrente de abertura e do tempo em retorno sobre a energia demandada para a abertura.

Os resultados sugerem que a técnica proposta permite o ajuste do comprimento do arco na abertura com o controle da energia. Dentre os experimentos realizados o uso dos menores níveis de corrente (50 A) e tempo em retorno (50 ms), foi considerado mais adequado, por resultar em comprimento de arco mais próximo do operacional, correspondente a uma tensão de base da ordem de 17 V e baixos níveis de energia na abertura.

A energia demandada na abertura com retorno de arame, 48 J, Figura 5.22, comparada aos resultados verificados por Santos (2002), 300 J, para abertura com elevados níveis de corrente, apresentou uma redução da ordem de 85% para as condições com a geometria da ponta arredondada.

A técnica de abertura de arco proposta pode ser aprimorada, pois permite a utilização de menores níveis de energia, que os praticados nos experimentos. Caso fossem utilizados maiores velocidades de arame no retorno, poderiam ser usados menores níveis de corrente e reduzido o tempo em retorno, de forma a obter um processo de abertura com menores níveis de energia, sem comprometer o comprimento de arco desejado.

5.5. Condições operacionais para o MIG CA do Aço

Os resultados dos experimentos realizados para determinar a taxa de fusão em polaridade negativa com fonte de tensão constante, estão apresentados na Tabela 5.5 e representados na Figura 5.23.

Tabela 5.5 - Taxa de fusão em polaridade negativa

Velocidade do arame Va (m/min)	1,5	2	2,5	3	3,5	4
Corrente média retificada Im(r)(A)	46	58	67	81	87	98

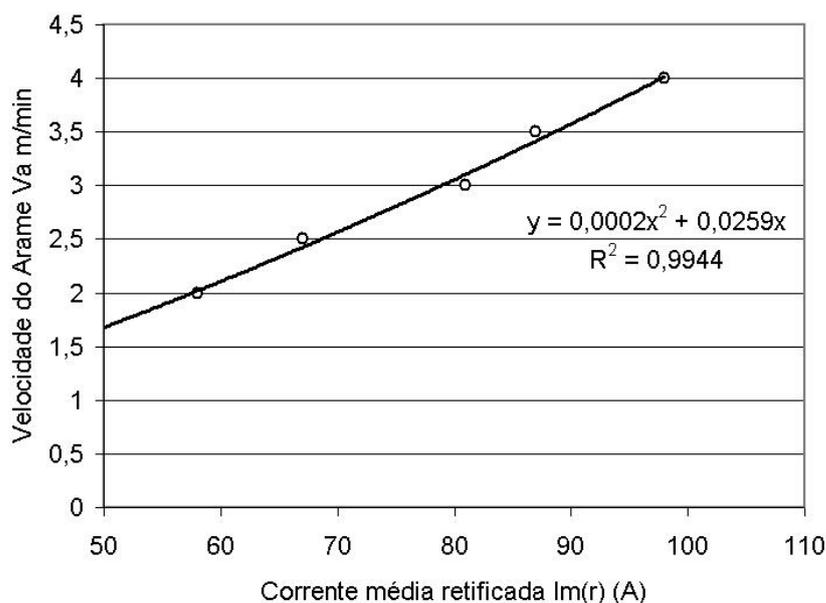


Figura 5.23- Taxa de fusão em polaridade negativa

Para as condições especificadas, a relação entre a taxa de fusão e a corrente, para a polaridade negativa (CC^-), como representado na Figura 5.23, pode ser expressa pela equação 5.3.

$$V_a = \alpha \cdot I_m(r) + \beta \cdot L \cdot I_m(r)^2 \quad (5.3)$$

onde: $\alpha=0,0259(\text{m} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{A}^{-1})$;

$\beta=0,0156 (\text{A}^{-2} \cdot \text{min}^{-1})$;

$L=0,010 (\text{m})$.

Os resultados dos experimentos realizados com MIG Pulsado (MIG-P) em polaridade positiva estão apresentados na Tabela 5.6 e representados na Figura 5.24.

Tabela 5.6 - Taxa de fusão MIG Pulsado em polaridade positiva

Velocidade do arame – V_a (m/min)	2,6	3,5	4,5	5,5
Corrente Média (A)	100	133	178	207

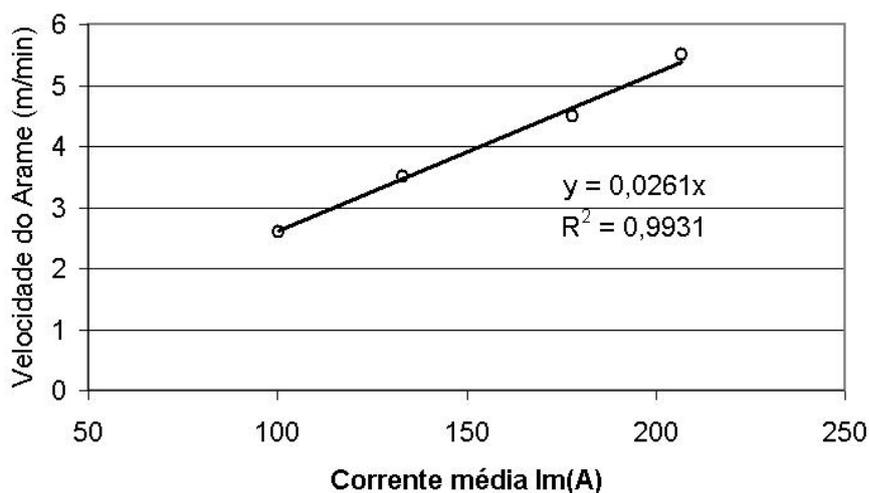


Figura 5.24 - Taxa de fusão MIG pulsado em polaridade positiva

Conforme equação apresentada na Figura 5.24, a relação entre a taxa de fusão e a corrente média para o MIG Pulsado em polaridade positiva, pode ser simplificada e expressa pela equação 5.4, que relaciona a velocidade do arame (V_a) com a corrente média (I_m), utilizando a constante K_p , sendo:

$$V_a = K_p \cdot I_m \quad (5.4)$$

onde: $K_p = 0,0261 (\text{m} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{A}^{-1})$.

Os resultados dos experimentos em polaridade negativa e positiva, representados simultaneamente, conforme Figura 5.25, indicam uma significativa diferença na taxa de fusão para cada polaridade.

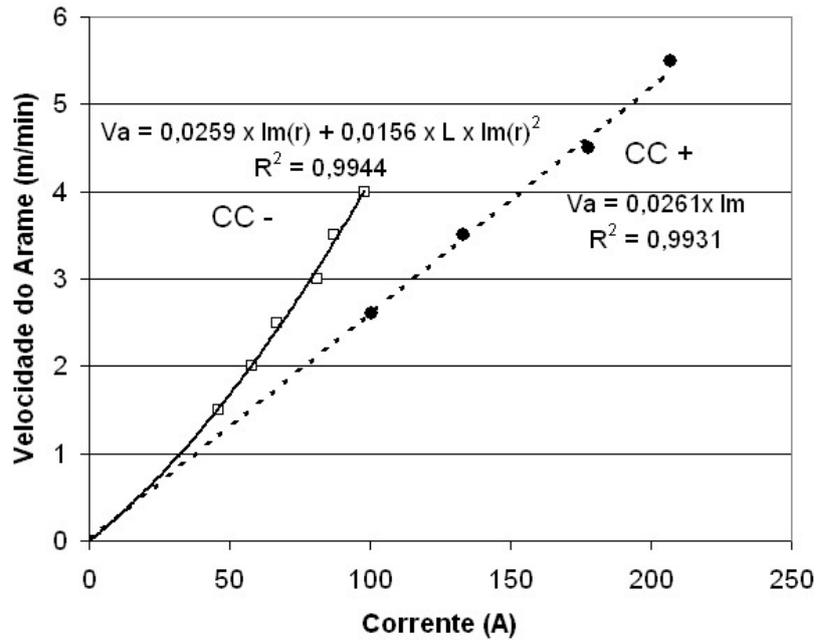


Figura 5.25 - Taxa de fusão CC- e CC+

Conforme representado na Figura 5.25, a taxa de fusão em polaridade negativa não varia linearmente com a corrente, entretanto, para simplificar os cálculos das variáveis de soldagem, tendo em vista a utilização de correntes negativas geralmente na faixa de 30 a 120 A no processo MIG CA, foi calculado, conforme equação 5.5, o valor médio representativo da constante (K_n) que relaciona a velocidade do arame (V_a) e a corrente média (I_m) tal que:

$$K_n = V_a / I_m \quad (5.5)$$

$$\text{Obtendo-se: } K_n = 0,038 \text{ (m} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{A}^{-1}\text{)}$$

Como proposto, considerando que a taxa média de fusão para o MIG CA é resultado da soma da fusão promovida em cada uma das fases, e supondo que pudesse ser estabelecida sistemática de cálculo da taxa de fusão baseada na média ponderada das taxas relativas a cada polaridade, estimou-se que a relação seria expressa pela equação 5.6.

$$V_a = ((K_p \times I_p \times t_p) + (K_n \times I_n \times t_n)) / (t_p + t_n) \quad (5.6)$$

$$\text{Onde: } K_n = 0,038 \text{ (m} \times \text{min}^{-1} \times \text{A}^{-1}\text{);}$$

$$K_p = 0,026 \text{ (m} \times \text{min}^{-1} \times \text{A}^{-1}\text{)}$$

Para verificar a adequação da relação descrita acima, foram realizados os experimentos apresentados na Tabela 5.7, utilizando forma de onda de corrente alternada retangular conforme Figura 4.18. Durante os experimentos, ao longo da soldagem de cada cordão, foi efetuado o ajuste da amplitude da corrente na polaridade negativa (I_n), até obtenção do equilíbrio entre a taxa de fusão e a velocidade do arame, o que resultou nos valores reais de amplitude de corrente na polaridade negativa (I_n real) apresentados na Tabela

5.7. Entretanto era esperado que as amplitudes para a corrente na fase negativa assumissem os valores estimados ($I_{n\text{est}}$) com base na equação 5.7, decorrente da equação 5.6.

$$I_{n\text{est}} = ((V_a \times (t_p + t_n)) - (K_p \times I_p \times t_p)) / (I_n \times t_n) \quad (5.7)$$

Tabela 5.7 - Experimentos MIG CA para avaliação da taxa de fusão

V_a (m/min)	V_s (cm/min)	D_g (mm)	I_p (A)	t_p (ms)	t_n (ms)	$I_m(r)$ (A)	$I_{n\text{ est}}$ (A) $K_n^* = 0,038$	$I_{n\text{ real}}$ (A)	$K_n\text{ real}$ (m/minA)
2,1	42	1,37	350	4	30	70,3	30,6	33	0,035
3,0	60	1,37	350	4	20	102,5	45,9	53	0,033
3,8	76	1,37	350	4	15	131,3	61,2	73	0,032
4,5	90	1,37	350	4	12	158,0	76,5	94	0,031
5,1	102	1,37	350	4	10	177,1	91,8	108	0,032
6,0	120	1,37	350	4	8	209,3	114,8	139	0,031

Tendo sido verificada que a corrente ajustada para a fase negativa, não correspondeu aos valores estimados, concluiu-se que a taxa de fusão no MIG CA não pode ser calculada como média ponderada da taxa de fusão em cada polaridade, como foi proposto, entretanto, com base nos resultados, foi avaliada outra forma similar que pudesse fornecer uma estimativa coerente para a taxa de fusão no MIG CA.

Considerando que foram efetuados ajustes apenas na amplitude de corrente da fase negativa, ou seja, não foram realizados ajustes na fase positiva, as variações percebidas são decorrentes unicamente da variação da corrente da fase negativa. Desta forma, os resultados sugerem que um valor de K_n variando em uma faixa estreita, de 0,031 a 0,035, seria representativo. Para permitir a determinação prática da taxa de fusão no MIG CA Foi proposto utilizar o valor médio do coeficiente real obtido em cada ensaio. Este coeficiente médio foi identificado como $K_{n\text{real}}$ e determinado conforme equação 5.8.

$$K_{n\text{real}} = \sum_1^n (((V_a \times (t_p + t_n)) - (K_p \times I_p \times t_p)) / (I_n \times t_n)) / n \quad (5.8)$$

Considerando os resultados apresentados na Tabela 5.7, e a equação 5.8, o valor médio representativo da relação da taxa de fusão durante a fase negativa, $K_{n\text{real}}$, foi calculado como:

$$K_{n\text{real}} = 0,032 \text{ (m} \times \text{min}^{-1} \times \text{A}^{-1}\text{)}.$$

Desta forma a taxa de fusão no MIG CA poderia ser calculada com base na amplitude e duração de cada intervalo utilizando os coeficientes K_p , K_b e $K_{n\text{real}}$, conforme equação 5.9.

$$V_a = ((K_p \times I_p \times t_p) + (K_{n\text{real}} \times I_n \times t_n) + (K_b \times I_b \times t_b)) / (t_p + t_n + t_b) \quad (5.9)$$

$$\text{Onde: } K_{n\text{real}} = 0,032 \text{ (m} \times \text{min}^{-1} \times \text{A}^{-1}\text{)}$$

$$K_p = K_b = 0,026 \text{ (m} \times \text{min}^{-1} \times \text{A}^{-1}\text{)}$$

A avaliação da nova proposta demandou a proposição de outras condições que permitissem avaliar comparativamente a taxa de fusão estimada e a real. Para isto foi considerado mais adequado utilizar a forma de onda típica do processo MIG CA, apresentada na Figura 2.13, por ser mais complexa. Foram realizados experimentos utilizando diferentes percentuais de polaridade negativa (30, 50 e 70%), conforme Tabela 4.8. Neste conjunto de experimentos foi verificada boa estabilidade do processo e velocidade de alimentação compatível com a taxa de fusão, indicando que o sistema de determinação das variáveis com base nos coeficiente K_p , K_b , $K_{n_{real}}$ e na amplitude e duração de cada intervalo é satisfatório. Como previsto foi observado nos experimentos que o aumento do tempo em polaridade negativa favoreceu a redução da penetração, conforme Figura 5.26. O estudo deste método de cálculo da taxa de fusão do arame foi estendido para o alumínio conforme ensaios complementares apresentados no Capítulo 6.

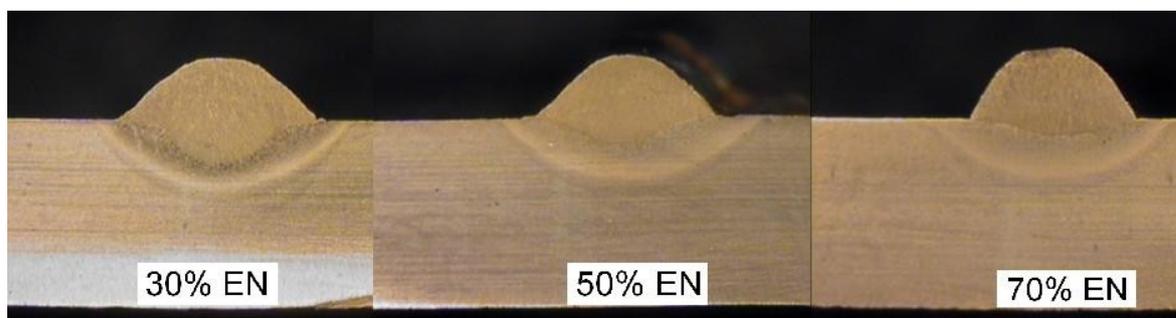


Figura 5.26 - Metalografias de cordões com diferentes períodos em polaridade negativa

Os experimentos projetados para avaliar a viabilidade de uso do processo MIG CA com forma de onda de corrente sem o intervalo de base positiva, foram realizados, com mesmo volume depositado e mesma corrente média retificada, conforme Tabela 4.9. Estes experimentos resultaram em depósitos regulares, de qualidade comparável ao MIG Pulsado CC^+ .

Deve-se destacar que os depósitos realizados com MIG CA (80% EN) sem utilização de base positiva, seja anterior ou posterior ao pulso, resultaram em significativa redução da penetração, sem comprometer a geometria do cordão, nem o acabamento, conforme apresentado na Figura 5.27. Estes resultados indicam ser possível e viável o uso do MIG CA com forma de onda sem a base positiva, que, apesar de não ser uma técnica usual, é uma das mais simples condições para utilização do processo MIG CA, tanto no que se refere à simplicidade da fonte de soldagem como na facilidade de seleção das variáveis.

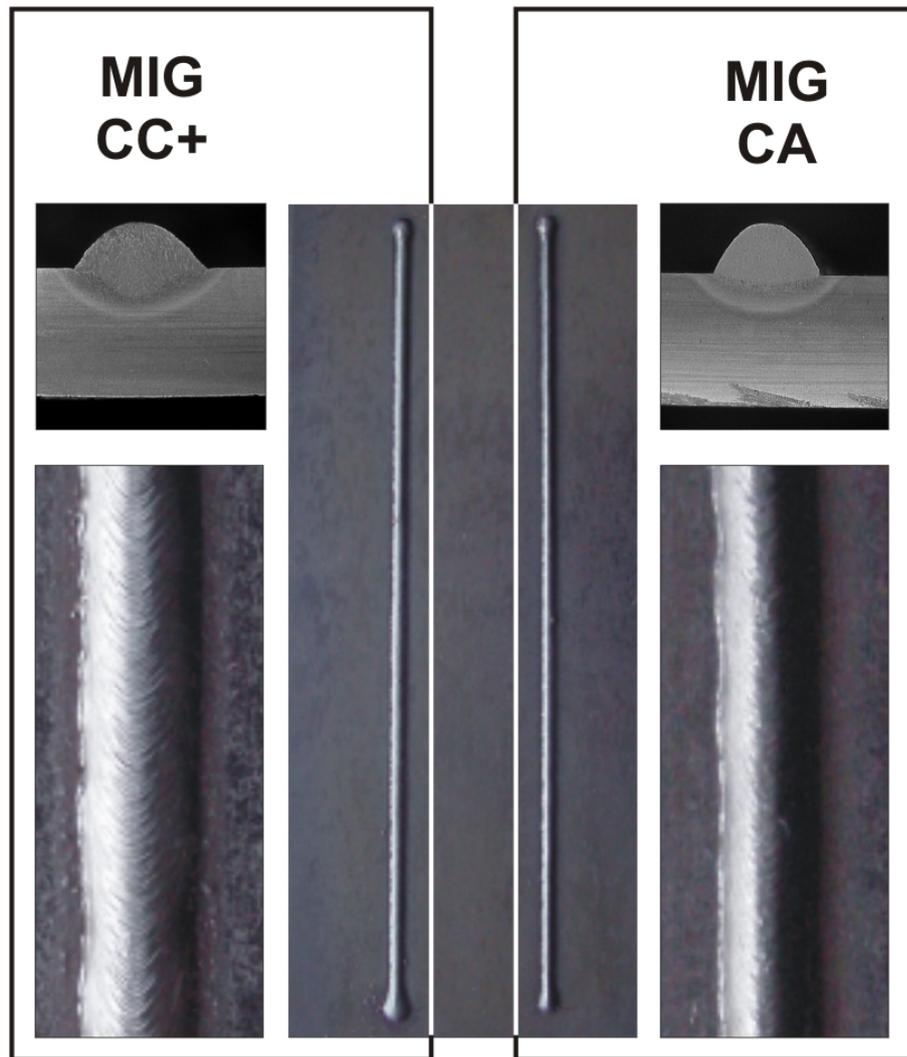


Figura 5.27 - Cordões depositados com CC+ e CA

5.6. Estudo da relação entre penetração, temperatura e tempo em polaridade negativa

Os experimentos para avaliar a aplicabilidade do processo MIG CA à recuperação de dutos em operação, consistiram na determinação da relação entre a penetração, a temperatura, decorrentes do uso do processo MIG CA com diferentes tempos em polaridade negativa. Os experimentos foram conduzidos conforme Tabela 4.10 e os resultados dos experimentos estão apresentados na Tabela 5.8. As metalografias correspondentes a estes ensaios estão apresentadas nas figuras 5.28 a 5.30 e o ciclo térmico do verso da chapa de cada ensaio, está apresentado nas figuras 5.31 a 5.33. Os conjuntos de resultados de penetração e ciclo térmico estão apresentados nas figuras 5.34 e 5.35, respectivamente.

Tabela 5.8 - Influência do % EN, espessura e Va na penetração e temperatura

Código do experimento	%EN	Va (m/min)	e (mm)	Vs (cm/min)	Penetração (mm)	Temperatura (°C)
AC0034	0	2,7	4,7	54	0,68	591
AC3034	30	2,7	4,7	54	1,01	456
AC5034	50	2,7	4,7	54	0,79	438
AC7034	70	2,7	4,7	54	0,75	544
AC0033	0	2,7	3,2	54	0,33	692
AC3033	30	2,7	3,2	54	0,92	700
AC5033	50	2,7	3,2	54	0,91	684
AC7033	70	2,7	3,2	54	0,22	690
AC0032	0	2,7	2	54	0,94	691
AC3032	30	2,7	2	54	1,18	860
AC5032	50	2,7	2	54	0,99	769
AC7032	70	2,7	2	54	0,65	Falha na aquisição

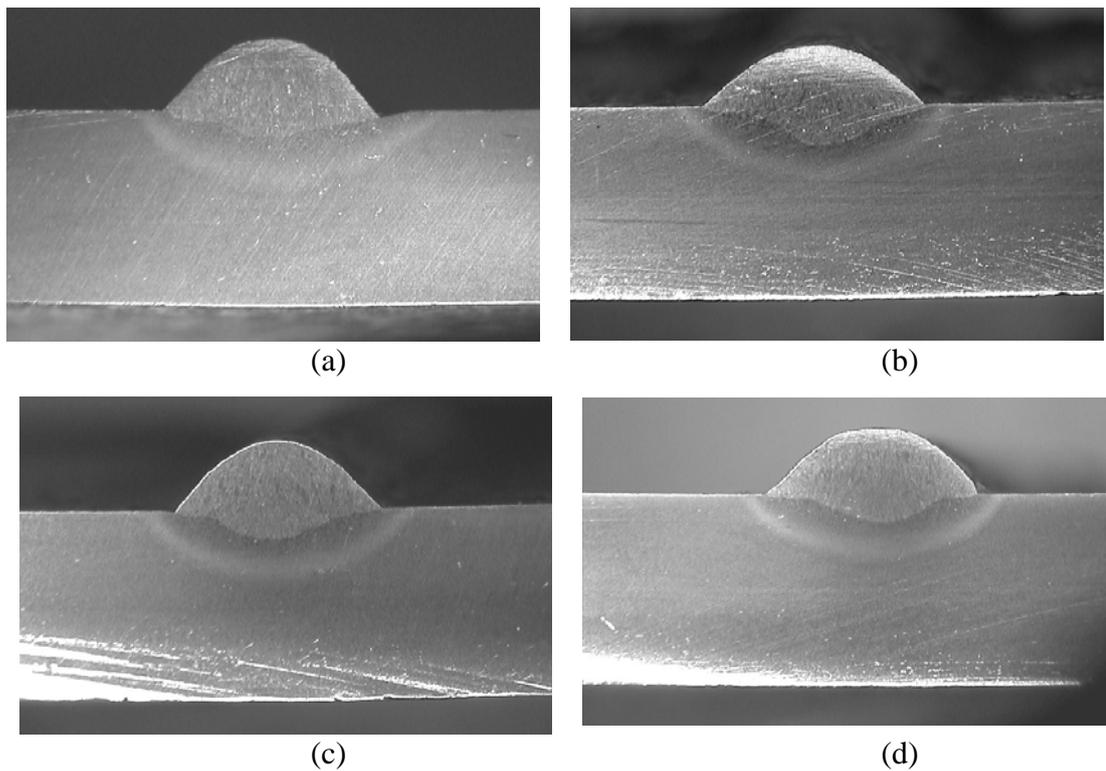


Figura 5.28 - Metalografias relativas aos experimentos em chapa de 4,7 mm (a)AC0034; (b)AC3034; (c)AC5034; (d)AC7034)

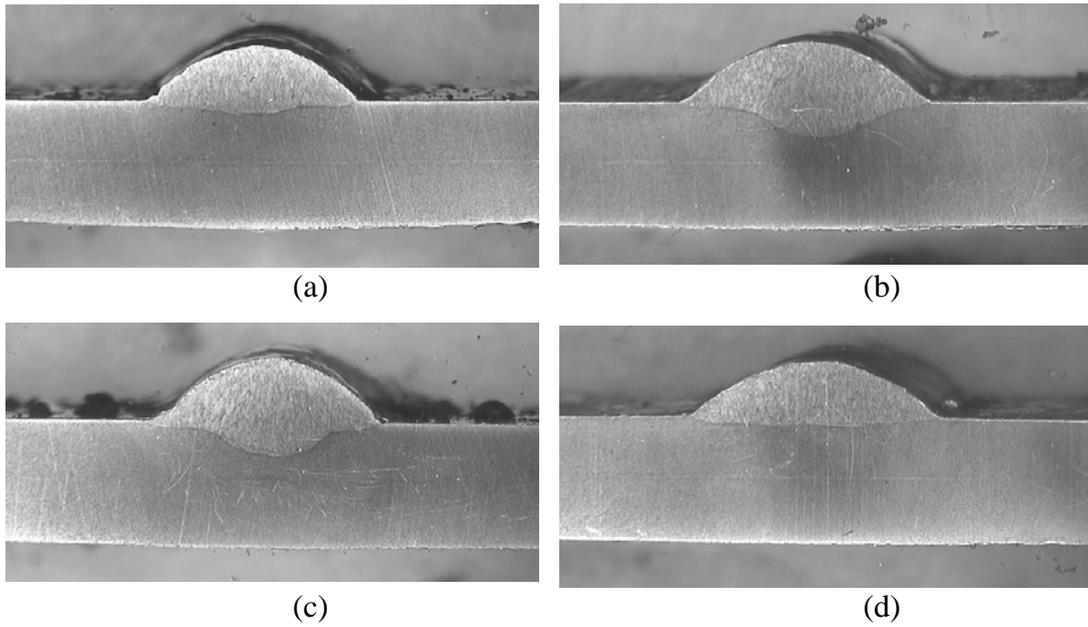


Figura 5.29 - Metalografias relativas aos experimentos em chapa de 3,2 mm (a)AC0033; (b)AC3033; (c)AC5033; (d)AC7033)

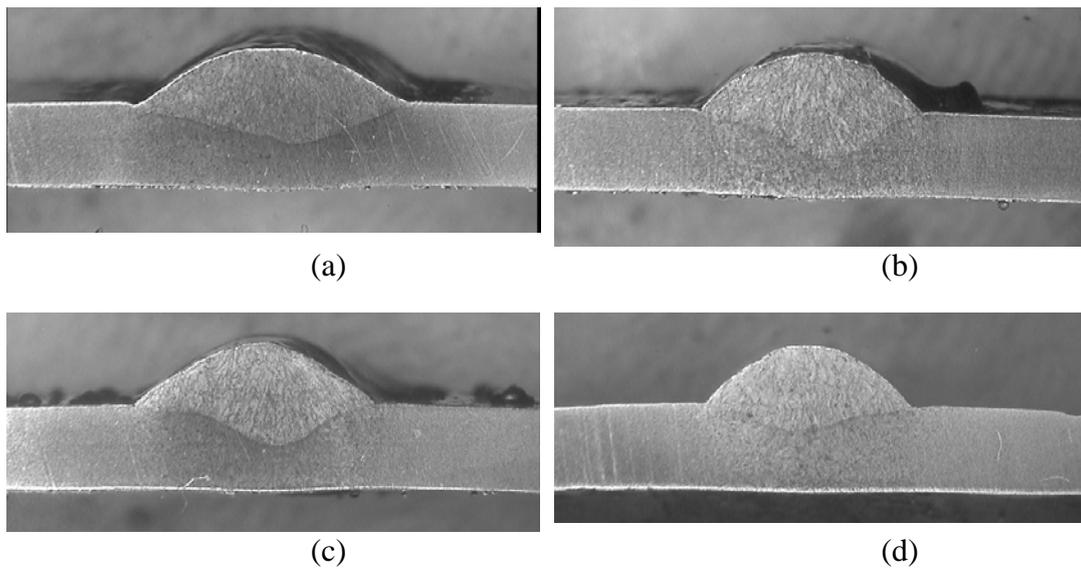


Figura 5.30 - Metalografias relativas aos experimentos em chapa de 2 mm (a)AC0032; (b)AC3032; (c)AC5032; (d)AC7032)

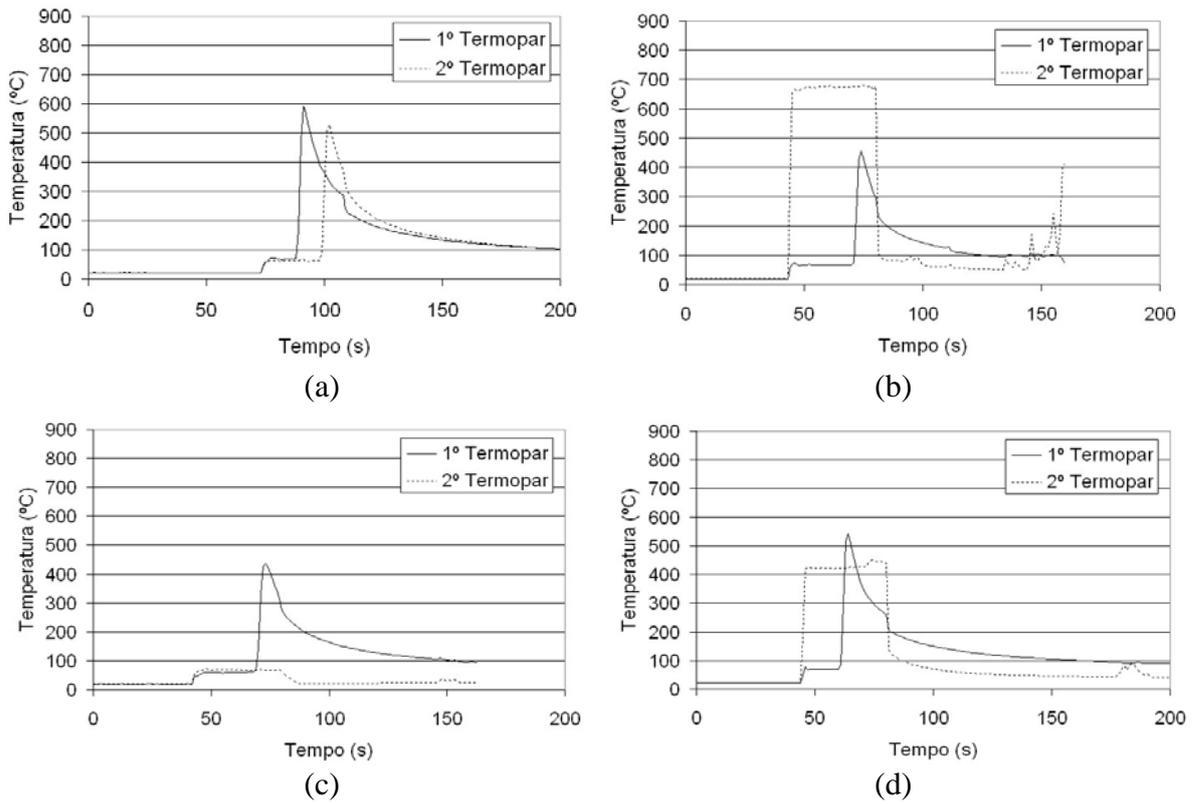


Figura 5.31 - Ciclos térmicos relativos aos experimentos em chapa de 4,7 mm
 (a)AC0034; (b)AC3034; (c)AC5034; (d)AC7034

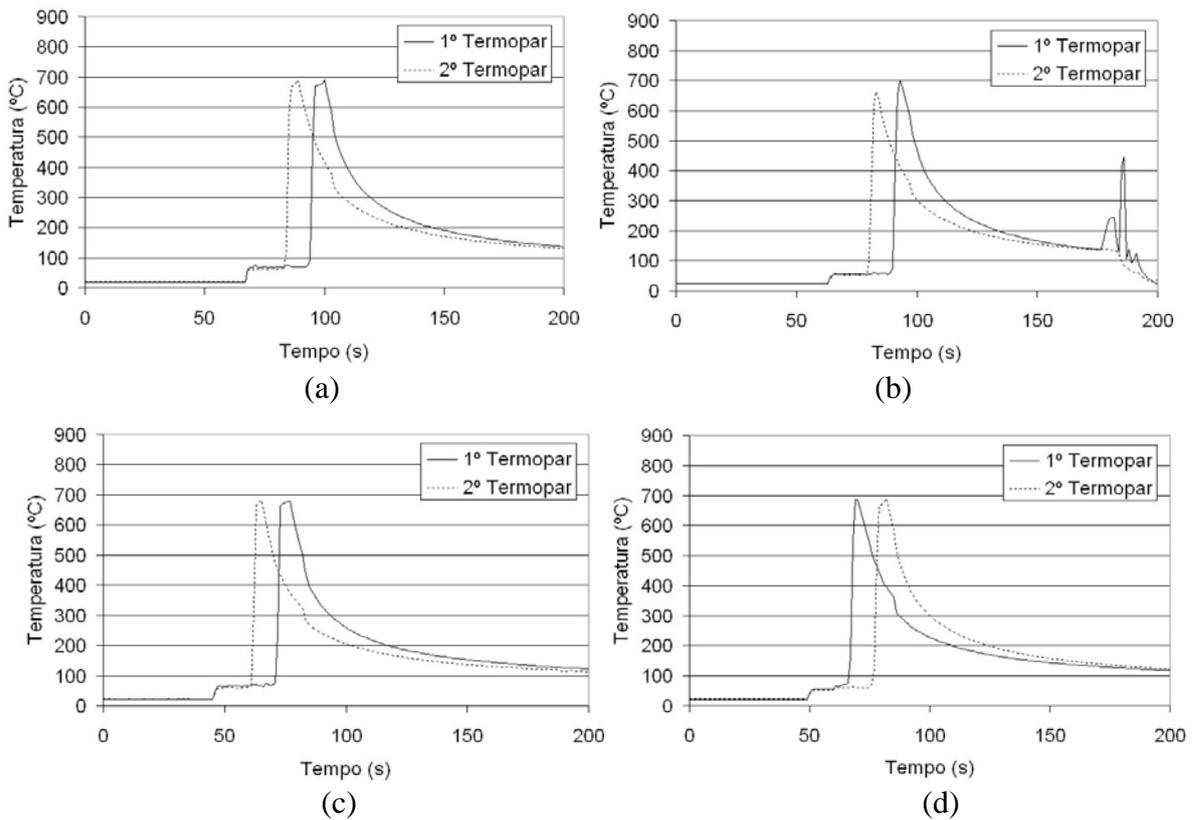


Figura 5.32 - Ciclos térmicos relativos aos experimentos em chapa de 3,2 mm
 (a)AC0033; (b)AC3033; (c)AC5033; (d)AC7033

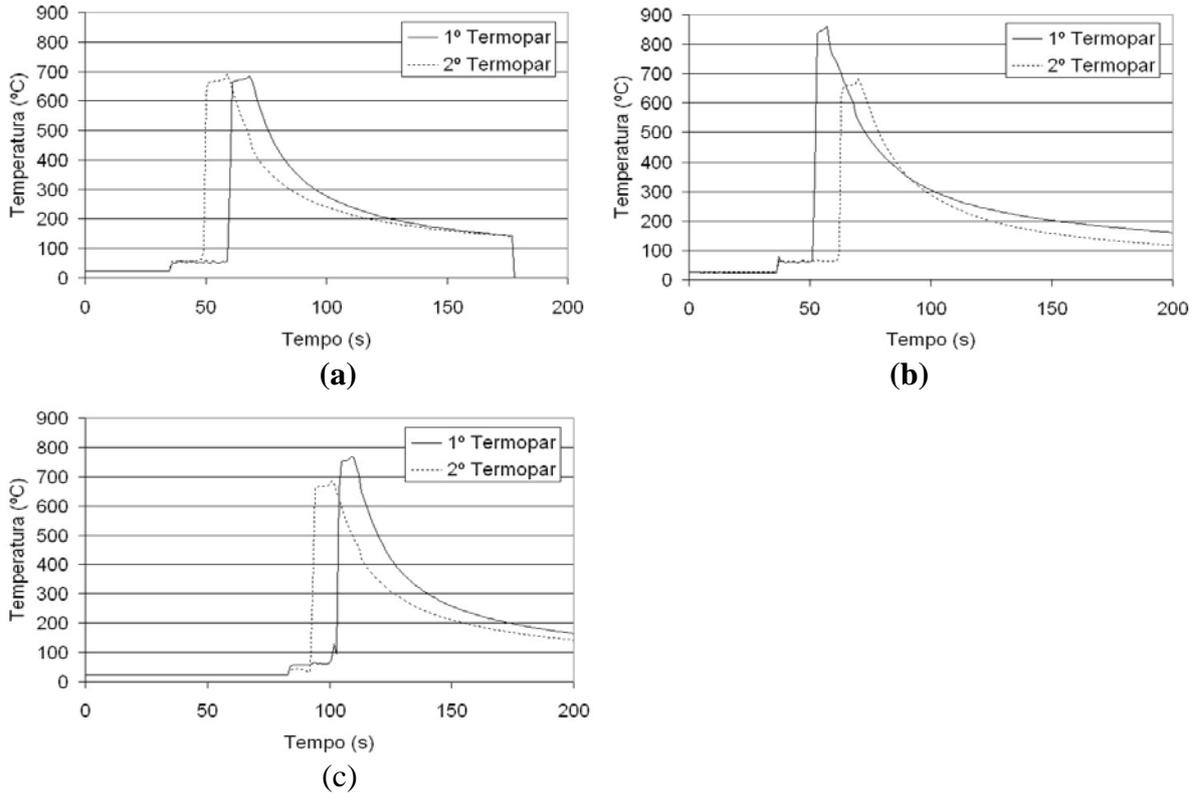


Figura 5.33 - Ciclos térmicos relativos aos experimentos em chapa de 2 mm (a)AC0032; (b)AC3032; (c)AC5032

Alguns sinais de termopar foram comprometidos devido a falhas em conexões, ruídos ou destacamento do termopar, sendo consideradas apenas as leituras representativas do ciclo térmico. Para os casos em que os dois termopares forneceram leituras válidas, foi considerada a condição de maior temperatura.

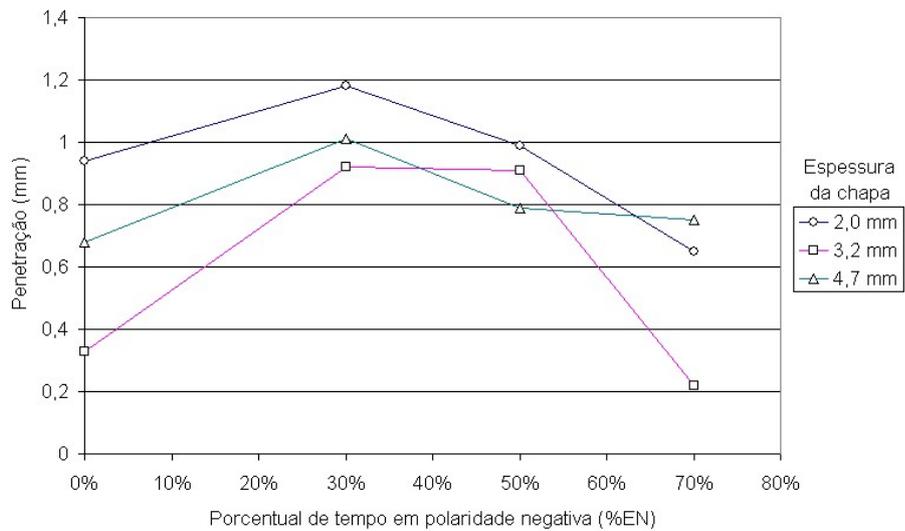


Figura 5.34 - Relação entre %EN e Penetração

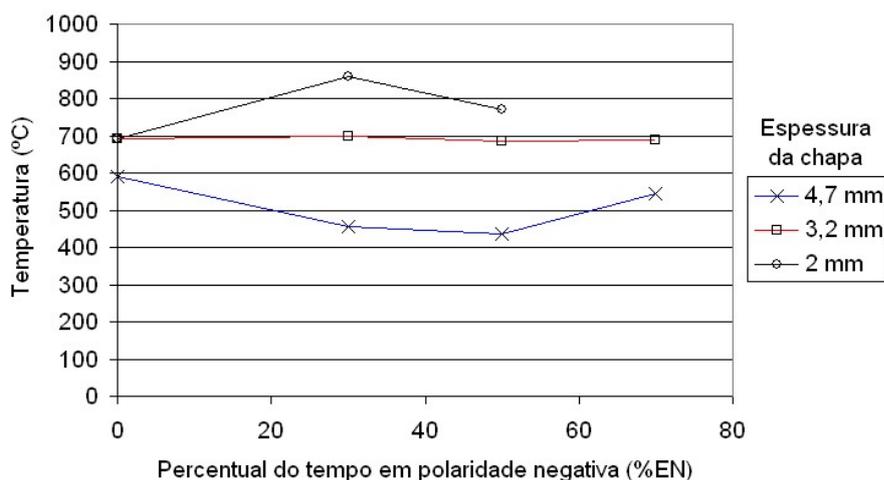


Figura 5.35 - Relação entre %EN e Temperatura

Os resultados indicam que há uma tendência à redução da penetração com o aumento do percentual em polaridade negativa, entretanto foi observado que os ensaios com MIG pulsado em corrente contínua, ou seja 0% de EN, apresentaram menor penetração que os ensaios com apenas 30% de EN, conforme Figura 5.34, o que aparentemente não condiz com as referências bibliográficas, e desta forma motivou a realização de análises complementares e novos ensaios.

Conforme apresentado na Figura 5.35, todos os ensaios resultaram em temperatura abaixo de 980°C, limite estabelecido como condição de risco de perfuração em dutos de petróleo, sugerindo que mesmo o uso do processo MIG pulsado pode ser adequado para recuperação de dutos em operação da área de petróleo.

Tendo sido verificada maior penetração com o uso de polaridade negativa (30% EN) que no processo MIG pulsado (0%EN), questionou-se a ocorrência do mecanismo de escalada do arco no arame eletrodo, atribuído por vários autores como mecanismo fundamental no processo MIG CA, pois alguns fatores poderiam ter inibido a escalada do arco.

Um dos fatores que poderia ter inibido a escalada do arco seria o gás de proteção, uma vez que o percentual de CO₂ utilizado (8%) poderia favorecer a formação de óxidos e reduzir a necessidade de escalada do arco para emissão catódica, comprometendo o efeito esperado.

Outro aspecto considerado, que poderia inibir a escalada do arco, seria o nível de corrente usado na fase negativa (60 A), considerado baixo se comparado ao utilizado por alguns pesquisadores, o que levou ao questionamento quanto à interação entre o nível de corrente e o gás de proteção utilizado, ambos envolvidos no mecanismo de escalada do arco no arame eletrodo.

A verificação do fenômeno da escalada do arco demandou a realização de experimentos com filmagem de alta velocidade que estão apresentados no Capítulo 6 –

Ensaio Complementares. Os resultados indicam que para gás de proteção utilizado, (Ar + 8% de CO₂), e para os níveis de corrente utilizados (In=60 A), não houve comprometimento do fenômeno da escalada do arco, conforme Figura 5.36.



Figura 5.36 - Arco MIG CA na polaridade negativa (70%EN e In=60 A)

Adicionalmente verificou-se em filmagens que a transferência metálica se deu com uma gota por pulso, indicando que as variáveis utilizadas estão adequadas, e que para este gás de proteção, não foi observada forte repulsão da gota, conforme Figura 5.37 (70 % EN In=60 A), embora Nascimento et al (2007), relate forte repulsão para condições com 70% EN conforme Figura 5.38 (70% EN In=198 A). Outros fatores, não abordados no presente trabalho, podem ter contribuído para reduzir a repulsão das gotas, tais como o nível de corrente negativa aplicada, o gás de proteção e o diâmetro das gotas.



Figura 5.37 - Transferência metálica no MIG CA com Ar+8% CO₂ (70% EN e In=60 A)



Figura 5.38 - Transferência metálica verificada por Nascimento et al (2007) com Ar+2% O₂ (70% EN e IN=198 A)

Outro aspecto considerado nas análises complementares foi a estabilidade do comprimento de arco durante os ensaios planejados, uma vez que nos experimentos não foi utilizado nenhum sistema de controle automático de comprimento do arco. Como não foi realizada filmagem do conjunto de experimentos inicialmente planejados, por falta de equipamento de filmagem, buscando avaliar o comportamento do comprimento do arco durante estes ensaios, foi realizada a análise dos oscilogramas de tensão e corrente dos experimentos realizados com chapas de 4,7 mm. Nesta análise foi verificada a tensão do arco durante o pulso de corrente, uma vez que os experimentos foram realizados com diferentes níveis de corrente de base, mas todos com a mesma corrente de pulso.

A análise dos oscilogramas de tensão e corrente indicou uma significativa diferença na tensão do arco entre os experimentos de um mesmo conjunto (mesma espessura de chapa e diferentes percentuais de EN), conforme Figura 5.39, indicando uma provável diferença de comprimento de arco entre os experimentos.

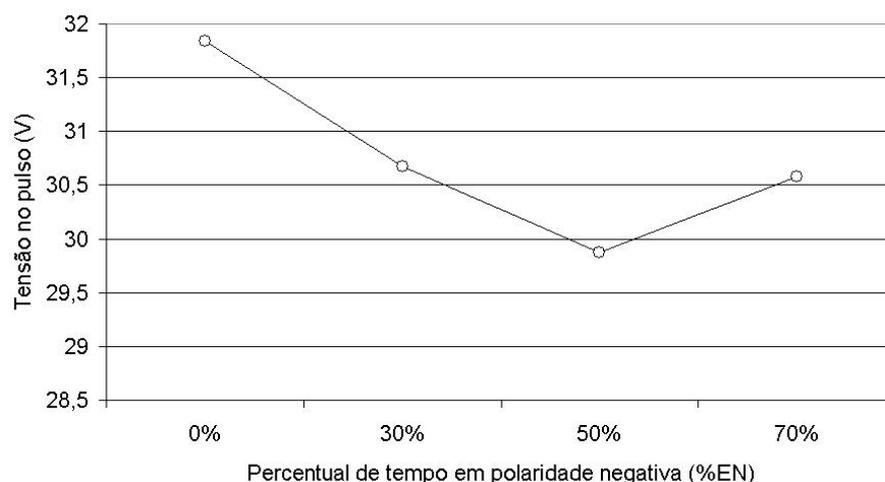


Figura 5.39 - Relação entre %EN e Tensão no pulso (AC0034;AC3034;AC5034 e AC7034)

Como a variação do comprimento do arco influencia a penetração, esta variação foi considerada como provável causa da reduzida penetração na soldagem com 0%EN. Para avaliar a suposta influência da diferença de comprimento de arco nos resultados, foram realizados dois novos experimentos com deposição sobre chapa de 4,7 mm. Nestes experimentos buscou-se, com maior rigor, manter o mesmo comprimento de arco (5 mm). Os ensaios consistiram em uma replicação do ensaio AC0034 (0% EN) e outro em CA com maior percentual em polaridade negativa (83% EN – AC8334).

Nestes ensaios complementares foi verificada uma penetração de 1,09 mm para a condição de 0%EN, divergindo da penetração observada anteriormente (0,68 mm) e uma penetração de 0,59 mm para 83%EN, conforme Figura 5.40.

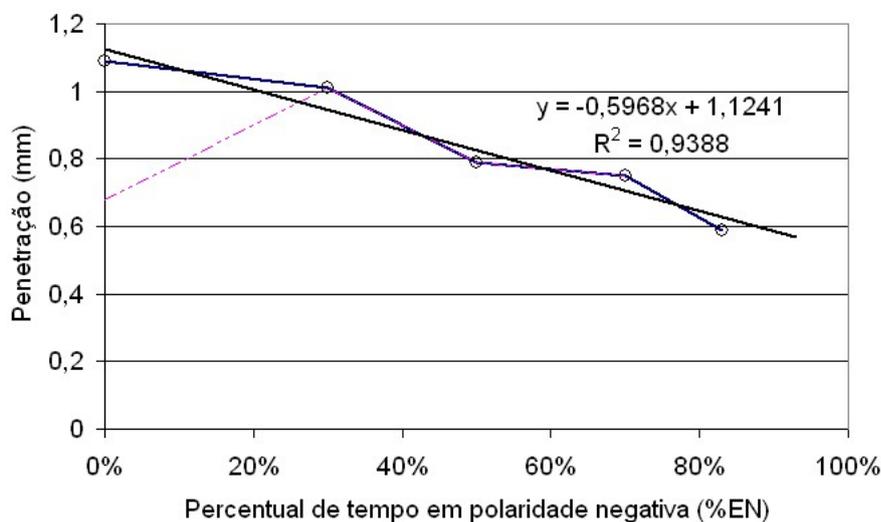


Figura 5.40 - Relação entre % EN e Penetração para chapa 4,7 mm

Estes resultados sugerem que para nível de variação de penetração em estudo, inferior a 1 mm, o descontrole do comprimento do arco pode comprometer os resultados, e que esta foi a provável causa da redução de penetração observada para as condições com 0%EN.

CAPÍTULO 6

6. ENSAIOS COMPLEMENTARES

6.1. MIG CA do Alumínio

Posteriormente aos ensaios com MIG CA do aço, o estudo relativo à determinação prática da taxa de fusão realizado para o aço foi estendido para o alumínio e avaliada a metodologia de cálculo da taxa de fusão, baseada na duração e a amplitude dos intervalos em cada polaridade, conforme equação 6.1 análoga à 5.6. Para melhor compreensão é recomendável consultar o item 5.5.

$$V_{al} = ((K_{p_{al}} \times I_p \times t_p) + (K_{n_{al}} \times I_n \times t_n)) / (t_p + t_n) \quad (6.1)$$

Onde: V_{al} é a velocidade de arame estimada

$K_{n_{al}}$ e $K_{p_{al}}$ são as constantes de proporcionalidade calculadas a partir de uma condição operacional já identificada para a soldagem MIG CA com arame ER 4043 com 1,2 mm de diâmetro e gás de proteção Argônio, sendo:

$$K_{n_{al}} = 0,095 \text{ (m} \times \text{min}^{-1} \times \text{A}^{-1}\text{)};$$

$$K_{p_{al}} = 0,044 \text{ (m} \times \text{min}^{-1} \times \text{A}^{-1}\text{)}$$

Para avaliar a metodologia aplicada ao alumínio, foram realizados cálculos para determinação das variáveis (t_n , I_n , t_b , I_b) para quatro condições de %EN (0, 30, 50 e 70 %EN), conforme Tabela 6.1. Os ensaios foram realizados com deposição sobre chapa de 2 mm de espessura, Figura 6.1, tendo sido observado que houve equilíbrio entre a taxa de fusão e alimentação do arame, indicando que a metodologia de cálculo também é satisfatória para o alumínio. A redução da penetração com o aumento do tempo em polaridade negativa também foi verificada para o alumínio e considerada mais acentuada que a observada em aço, o que pode estar associado à grande diferença de taxa de fusão durante a fase negativa.

Tabela 6.1 – Conjunto de variáveis para experimentos MIG CA – Al com diferentes percentuais de tempo em polaridade negativa

% EN	V_a (m/min)	I_p (A)	T_p (ms)	I_b (A)	t_b (ms)	I_n (A)	t_n (ms)
0%	3,1	170	5,7	40	18,9	0	0
30%	3,1	170	5,7	38	11,5	20	7,4
50%	3,1	170	5,7	33	6,6	20	12,3
70%	3,1	170	5,7	5	1,7	20	17,2

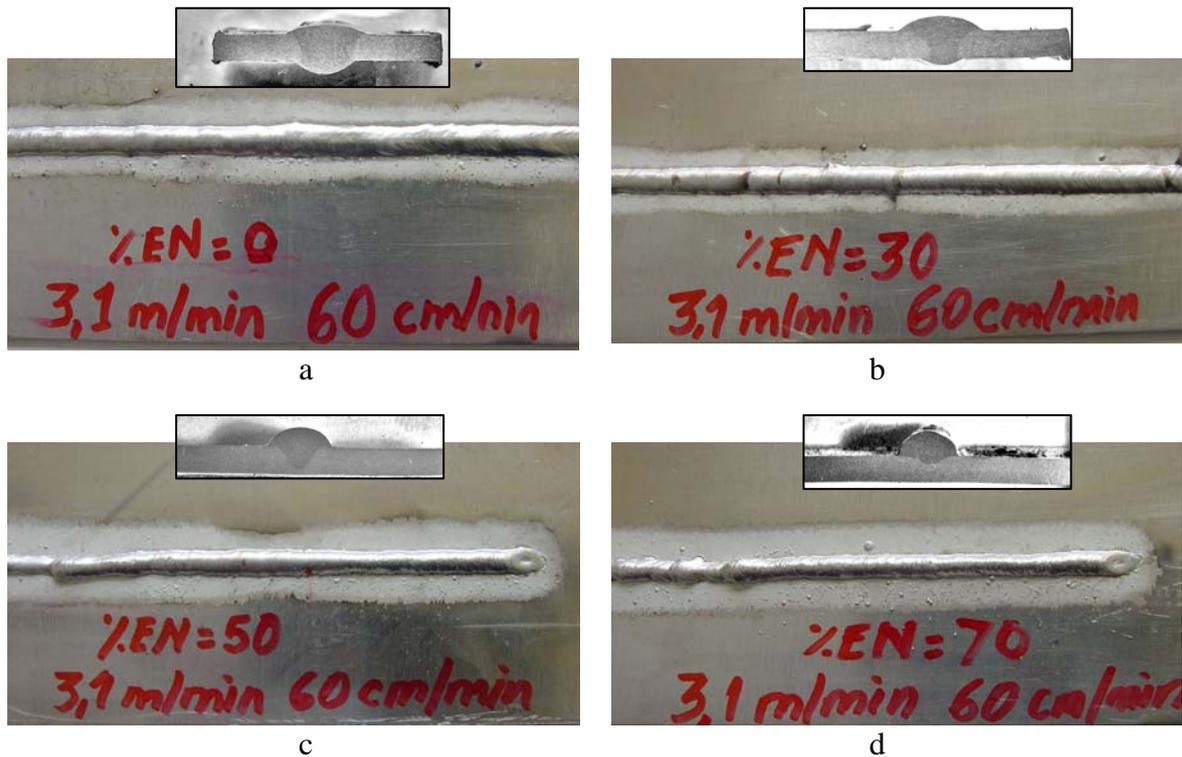


Figura 6.1 - Depósitos MIG CA – Alumínio -(a) 0% EN; (b) 30% EN; (c) 50% EN; (d) 70% EN.

Com base nas condições operacionais, equipamento, forma de onda e variáveis desenvolvidas para o processo MIG CA do alumínio, foi identificada como oportunidade promissora a aplicação desta tecnologia, à brazagem MIG CA, que pode constituir uma nova linha de pesquisa. Neste sentido foram conduzidos alguns ensaios exploratórios visando avaliar a união de chapas de alumínio com chapas galvanizadas (aço). Os resultados, conforme Figura 6.2, são satisfatórios do ponto de vista de operacionalidade e acabamento, entretanto estudos mais específicos devem ser conduzidos em trabalhos futuros para avaliar adequadamente a aplicabilidade deste processo neste tipo de união.

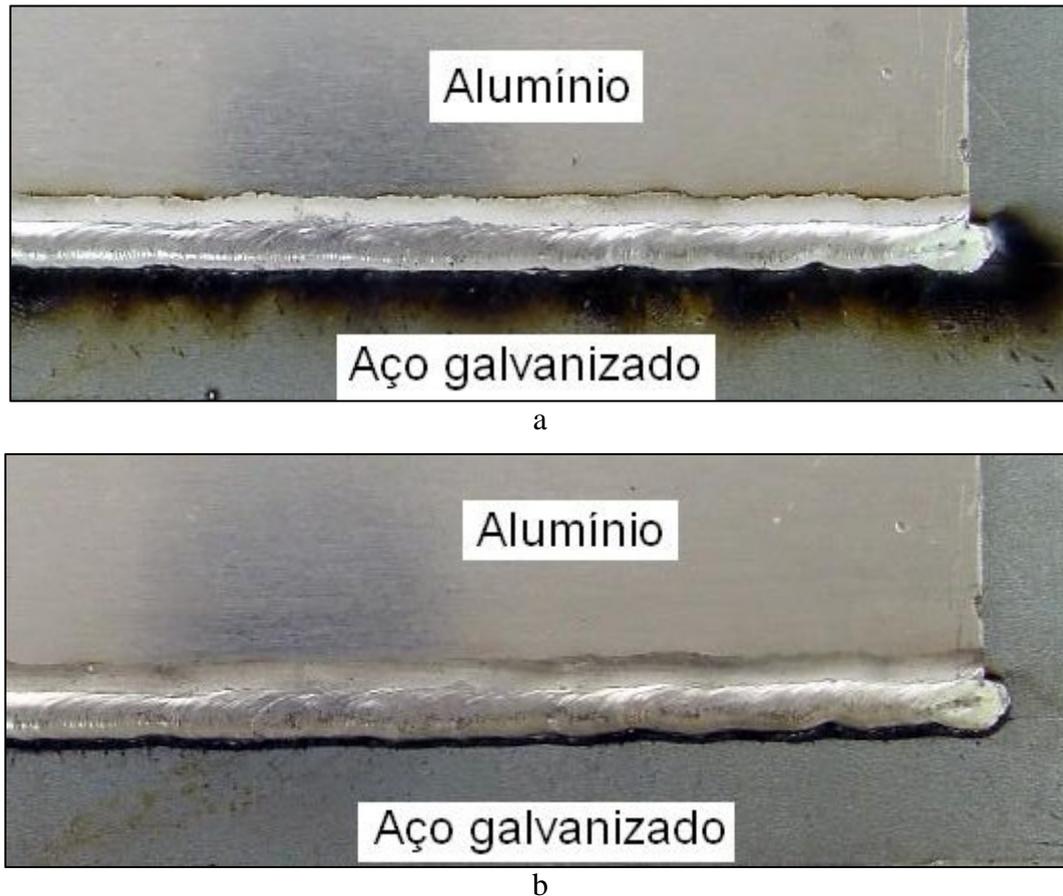


Figura 6.2 - Brazagem MIG CA – Alumínio & Aço (galvanizada); (a) aspecto após soldagem (b) aspecto após remoção de fuligem

6.2. MIG CA do Aço

A soldagem do aço, diferentemente do alumínio, por utilizar misturas de gases de proteção com teores de CO_2 ou O_2 , poderia não apresentar a escalada do arco, e não ter o mesmo efeito, na taxa de fusão e na penetração, observado no alumínio. Para verificar se houve comprometimento da escalada do arco na soldagem do aço e se a transferência metálica estava adequada, foram realizados ensaios complementares no Laprosolda da UFU (Universidade Federal de Uberlândia) filmados com câmeras de alta velocidade.

Nestes ensaios, variou-se a corrente negativa, o tempo em polaridade negativa (% EN), e o gás de proteção. Para cada experimento foram realizadas três medições da escalada do arco, baseadas nas imagens capturadas ao final da fase negativa, de forma a verificar o comprimento escalado pelo arco. O conjunto de variáveis e a média do comprimento escalado pelo arco no arame, para cada condição, está apresentado na Tabela 6.2.

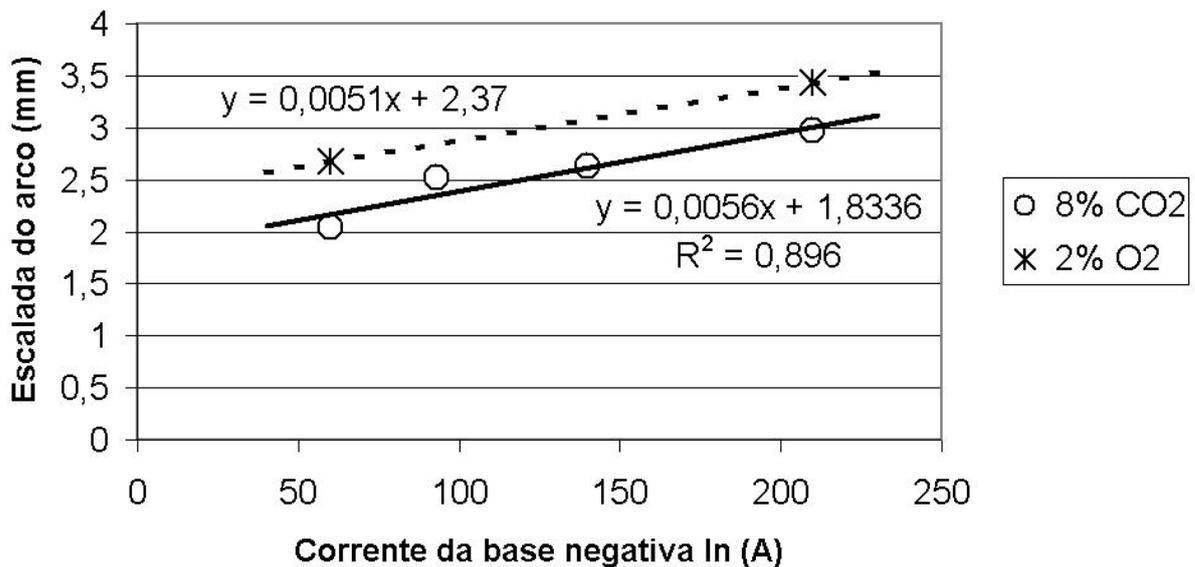
Tabela 6.2 - Experimentos com filmagem da escalada do arco no arame

Código do experimento	% EN	Ip (A)	tp (ms)	Ib (A)	tb (A)	In (A)	tn (ms)	Gás de Proteção	Escalada do arco (mm)
U7033	70%	300	4	101	3	60	16,7	Ar+8%CO2	2,0
U6043	60%	300	4	101	3	93	10,7	Ar+8%CO2	2,5
U5053	50%	300	4	101	3	140	7,1	Ar+8%CO2	2,6
U4063	40%	300	4	101	3	210	4,8	Ar+8%CO2	3,0
U7033O2	70%	300	4	101	3	60	16,7	Ar+2% O2	2,7
U4063O2	40%	300	4	101	3	210	4,8	Ar+2% O2	3,4

Foi realizada a Anova das medições, Tabela 6.3, que indicou que os dois fatores considerados, amplitude da corrente na fase negativa e gás de proteção utilizado, bem como a interação destes fatores, influenciam a escalada do arco no arame, conforme Figura 6.3.

Tabela 6.3 - ANOVA da escalada do arco

Fatores	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de liberdade (gl)	Quadrado Médio (QM)	Razão F	Probabilidade de erro do tipo I (p)
Corrente In	2,18	3	0,73	161,99	0,000000
Gás	0,92	1	0,92	204,35	0,000000
Erro	0,06	13	0,00		

**Figura 6.3 - Influência da corrente e gás de proteção na escalada do arco**

Os ensaios realizados com deposição sobre chapa de 3,2 mm de espessura, resultaram em bom acabamento superficial para todas as condições de soldagem, sem comprometimento da geometria do cordão e sem ocorrência significativa de respingos, conforme verificado na Figura 6.4 (a,b c, d, e, f).



a



b



c



d



e



f

Figura 6.4 - Cordões depositados em chapa de aço de 3.2 mm de espessura (a) U7033; (b) U6043; (c) U5053; (d) U4063; (e) U7033O2; (f)U4063O2.

Embora o uso de uma corrente de base negativa da ordem de 60 A, combinada com gás de proteção Ar+8%CO₂ nos ensaios principais realizados neste trabalho, não tenham comprometido a escalada do arco, os resultados destes ensaios complementares confirmaram a suspeita de que a amplitude da corrente na fase negativa e o gás de proteção poderiam afetar a escalada do arco.

Os resultados destes ensaios complementares, indicam que estes fatores, amplitude de corrente na fase negativa e gás de proteção, devem ser melhor avaliados, a fim de identificar o conjunto mais adequado destes fatores, que resultem na melhor molhabilidade e acabamento, sem comprometer a transferência metálica e escalada do arco durante a fase negativa. Para a identificação proposta, será necessária uma avaliação criteriosa, fundamentada em experimentos com diferentes misturas gasosas, acompanhados de monitoração por filmagem de alta velocidade a fim de verificar as condições do arco e da transferência metálica. Tendo em vista a complexidade, no presente trabalho não foi possível conduzir esta investigação, que se constitui em uma proposta para novos trabalhos.

Visando a avaliação prática da aplicação do processo MIG CA à soldagem de recuperação de dutos em operação, foram conduzidos ensaios exploratórios simulando a soldagem de recuperação de dutos. Nestes experimentos foram utilizadas as variáveis do experimento AC7032 da Tabela 4.8 (70% EN), e efetuada deposição de vários cordões sobre chapa, figuras 6.5 a 6.7, e posteriormente, sobre tubo, figuras 6.8 a 8.10.

Nos ensaios foram utilizadas chapas e tubos com espessura de 2 mm, de forma a simular uma condição de dissipação térmica mais crítica, uma vez que a dissipação térmica é menor em comparação com condições práticas, onde a espessura do metal de base, na região de contorno da cavidade a ser preenchida é superior, facilitando a condução térmica e reduzindo o risco de perfuração.

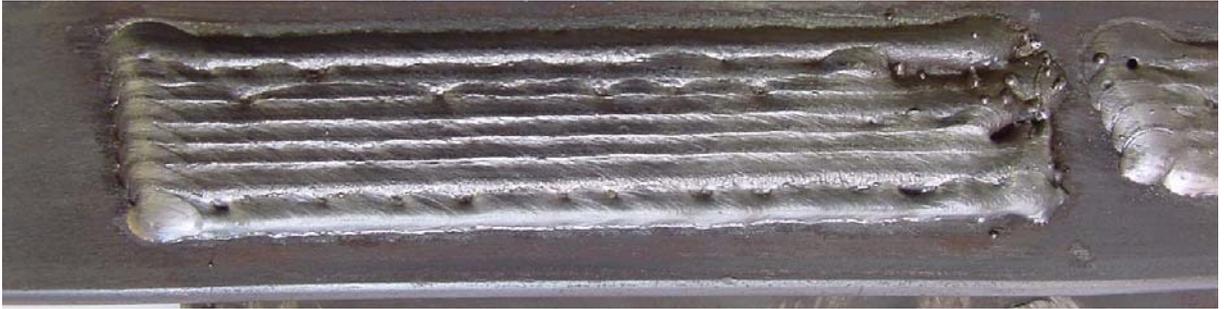


Figura 6.5 - Depósito de revestimento sobre chapa

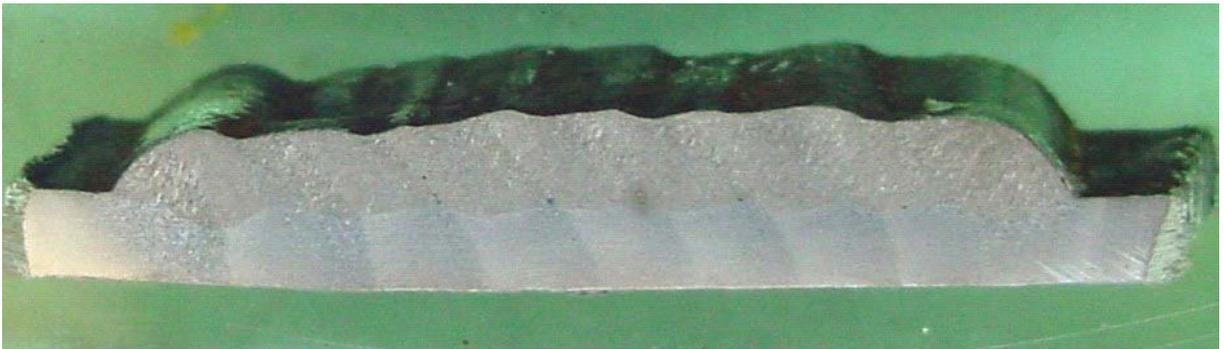


Figura 6.6 - Metalografia do revestimento sobre chapa

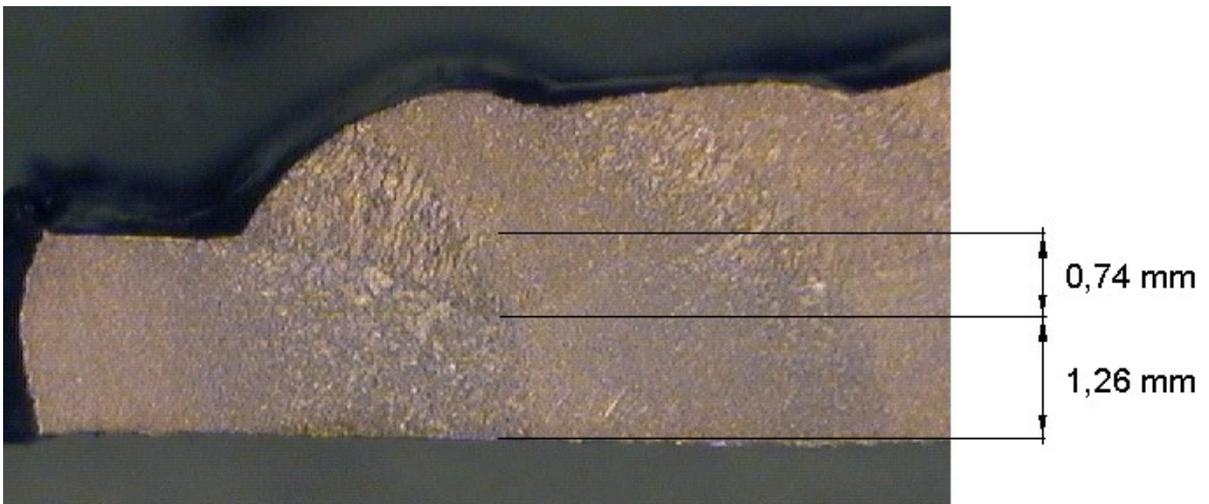


Figura 6.7 - Detalhe da penetração do 1º cordão do revestimento sobre chapa



Figura 6.8 - Depósito de revestimento sobre tubo

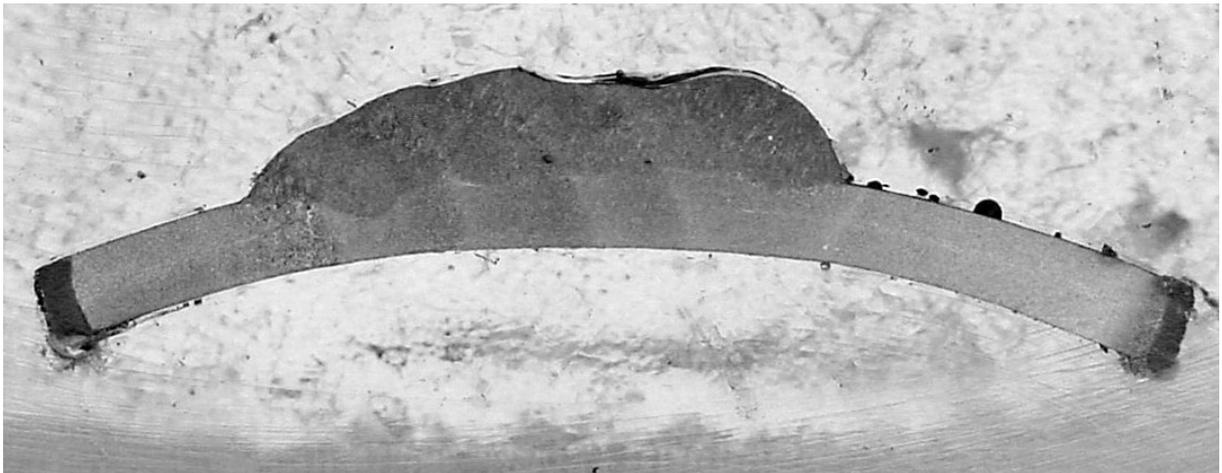


Figura 6.9 - Metalografia do revestimento sobre tubo

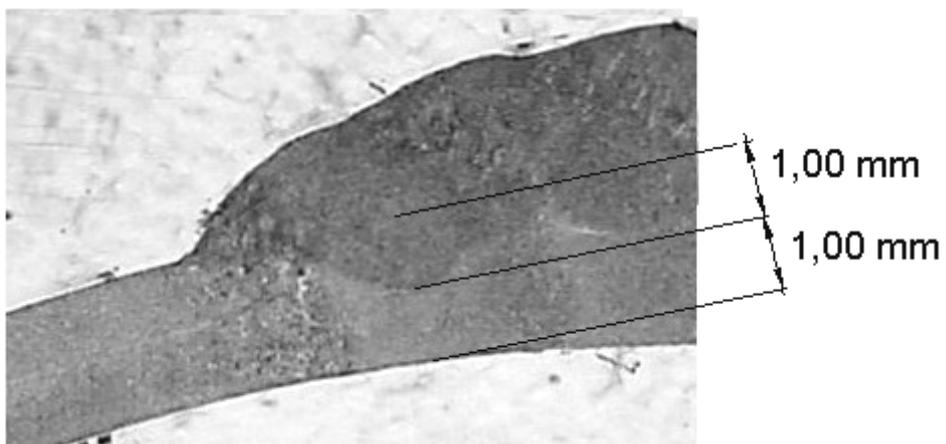


Figura 6.10 - Detalhe da penetração do 1º cordão do revestimento sobre tubo

Foi verificado nas figuras 6.6 e 6.9, que apenas o primeiro cordão depositado apresentou o perfil de penetração como verificado no conjunto principal de experimentos apresentado neste trabalho na Figura 5.30, sendo que os demais cordões, apoiados lateralmente no cordão anterior, apresentaram uma menor penetração, da ordem de 0,4 mm. Este fato é semelhante ao observado por Bruce (2000) em sua análise comparativa entre a simples deposição e a soldagem de filete, usada para instalação de dupla calha na recuperação de dutos em operação.

Esta constatação sugere que na recuperação de dutos em operação o primeiro cordão seja depositado em região de maior espessura, nas bordas externas à região de acentuada corrosão, fazendo com que os demais cordões sejam depositados posteriormente nas áreas críticas, de forma a assegurar menor penetração e menor temperatura no interior do duto.

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSÕES

Conclusões gerais sobre a tecnologia de soldagem MIG CA desenvolvida.

O desenvolvimento do sistema de reignição implementado na fonte de soldagem atendeu plenamente os propósitos de estudo do processo MIG CA tanto para o aço como para o alumínio.

O novo cabeçote alimentador de arame, desenvolvido com sistema de controle do movimento de reversão permitiu a realização de todos os ensaios para estruturação da técnica de abertura de arco com retorno do arame. Esta tecnologia foi incorporada ao processo Plasma-MIG, sendo este cabeçote também aplicável a este processo.

O SICA – Sistema Integrado de Controle e Aquisição permitiu a estruturação de formas de onda de grande complexidade, como a escalonada, permitindo a redução do número de ensaios e dos erros aleatórios associados.

A forma de onda de corrente com baixos níveis de corrente, desenvolvida para o MIG CA do alumínio resultou em boas condições operacionais e soldagem com bom acabamento, inclusive quando aplicada à brazagem MIG CA.

Para o aço o gás de proteção e a amplitude de corrente da fase negativa exercem influencia no comprimento escalado pelo arco no arame, durante esta fase.

Conclusões sobre a relação entre tensão, corrente e comprimento de arco para o alumínio.

Para o alumínio, nas condições estabelecidas, os resultados indicam que a leitura da tensão do arco medida durante o intervalo de base positiva do MIG CA é mais adequada para indicar o comprimento de arco que nos demais intervalos.

Foi identificada a relação entre a tensão, a corrente e o comprimento de arco, durante o intervalo de base positiva do MIG CA, para as condições estabelecidas para o alumínio, que pode ser expressa pela equação 5.2.

A tensão média do arco correspondente à base positiva do MIG CA pode ser afetada pela duração da base, em decorrência da existência de uma rampa de tensão imediatamente após mudança da polaridade. Este aspecto deve ser considerado para a construção de sistemas automáticos de controle de comprimento do arco que utilizem a tensão como referência de comprimento do arco.

Conclusões sobre a estabilidade do comprimento de arco para o alumínio

O sistema de controle do comprimento do arco proposto para o alumínio, baseado na monitoração da tensão durante a base positiva, e atuando na modulação da amplitude da corrente de base, aplicado ao MIG pulsado, foi capaz de manter estabilidade da tensão de base, para as condições estabelecidas.

O sistema proposto para controlar o comprimento do arco promoveu significativas variações na corrente média, o que pode comprometer a aplicabilidade do processo quando consideradas condições com riscos de acidente na ocorrência de perfuração.

Conclusões sobre a abertura do arco com retorno do arame para o alumínio.

Os resultados indicam que a técnica de abertura do arco com retorno do arame permite o ajuste do comprimento do arco imediatamente após a abertura e o controle da energia demandada na abertura.

Dentre os experimentos realizados, o uso dos menores níveis de corrente (50 A) e tempo em movimento de retorno do arame (50 ms), foi considerado mais adequado, por resultar em comprimento de arco mais próximo do operacional, correspondente a uma tensão de arco (na base) da ordem de 17 V e menores níveis de energia.

A energia demandada para a abertura com técnica proposta, com retorno do arame, apresentou redução em torno de 85% quando comparada à energia demandada para abertura com elevados níveis de corrente, para a condição de arame com a ponta arredondada.

A utilização do processo de abertura do arco com o retorno do arame assegura a abertura do arco sempre no ponto de contato do arame-eletrodo com o metal de base, e permite que o comprimento do arco imediatamente após a abertura, seja controlado mediante o adequado ajuste das variáveis utilizadas.

Conclusões sobre o processo MIG CA do Aço

Na determinação das variáveis do MIG CA para o aço, a taxa de fusão do arame não pode ser estimada como média ponderada da taxa de fusão em cada polaridade.

Foram identificados coeficientes que permitem calcular a taxa de fusão do arame com base na duração e amplitude de corrente de cada intervalo, possibilitando a elaboração de sistemas sinérgicos para determinação das variáveis de soldagem, conforme equação 5.9.

A utilização do gás de proteção com 92%Ar+8%CO₂ e amplitude de corrente de 60 A durante a fase negativa (In=60 A), não compromete a escalada do arco durante a fase negativa do MIG CA.

Para as condições estabelecidas nos ensaios MIG CA do aço, não foi verificada forte repulsão das gotas durante a transferência metálica.

O processo MIG CA aplicado ao aço pode ser conduzido com forma de onda sem base positiva, sem comprometer a soldagem.

Conclusões sobre a relação entre penetração, temperatura e tempo em polaridade negativa para o aço.

Para as condições estabelecidas, os ensaios com MIG CA em aço apresentaram redução da penetração proporcional ao percentual de tempo em polaridade negativa, sem comprometer a geometria do cordão, nem o acabamento.

Em todos os ensaios realizados as temperaturas máximas verificadas no verso dos corpos de prova não ultrapassaram o limite estabelecido como indicativo de risco de perfuração (980 °C) para a soldagem de dutos da área de petróleo, o que sugere que dutos em operação possam ser recuperados por soldagem MIG CA para espessuras remanescentes acima de 2 mm.

Para os níveis de penetração verificados nos experimentos (em torno de 0,7 mm), as variações de comprimento de arco podem exercer influência expressiva na penetração, quando comparada à variação promovida pela mudança de %EN, o que torna necessário o uso de um sistema eficaz de controle de comprimento do arco para o processo MIG CA.

CAPÍTULO 8**8. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS**

Com base nas pesquisas realizadas e nos resultados deste trabalho, alguns aspectos indicam oportunidades para desenvolvimento de novos trabalhos como segue:

- Identificar a relação entre comprimento de arco e geometria da solda para o processo MIG CA.
- Desenvolver um sistema eficaz de controle do comprimento do arco para os processos MIG CA e MIG pulsado, baseado na monitoração da tensão e corrente que atue na velocidade de alimentação do arame. Considerando a influência do comprimento do arco na geometria da solda, em especial na penetração, é fundamental o desenvolvimento do sistema de controle de comprimento de arco. As formas de controle baseadas na variação da corrente média implicam em variação da penetração, o que pode comprometer a soldagem em condições críticas, casos com forte indicação do uso do MIG CA, entretanto a modulação da velocidade do arame varia a taxa de alimentação e não a corrente média, o que indica uma possível viabilidade de uso.
- Avaliar o uso de outros gases de proteção para a soldagem MIG CA do alumínio, visando melhorar a estabilidade do comprimento do arco.
- Avaliar o uso de técnicas de controle do comprimento do arco baseadas na monitoração da luminosidade do arco MIG CA. Devem ser consideradas as diversas fases da forma de onda de corrente deste processo, que resultam em diferentes condições de luminosidade.
- Identificar a combinação mais adequada entre a amplitude de corrente na fase negativa e o gás de proteção. Há perspectiva de se identificar a melhor combinação destes dois fatores, considerando a molhabilidade e acabamento do cordão depositado, a escalada do arco durante a fase negativa e a condição de transferência metálica (destacamento de uma gota por pulso e sem repulsão da gota).
- Avaliar as propriedades mecânicas e metalúrgicas decorrentes da soldagem MIG CA de tubos como o API 5L Gr B , amplamente usado em indústrias de petróleo.
- Avaliar os efeitos da pulsação térmica nas propriedades mecânicas e metalúrgicas da soldagem MIG CA de tubos como o API 5L Gr B.
- Avaliar a viabilidade de utilização de arames tubulares no processo MIG CA de recuperação de dutos em operação e sujeitos à presença de impurezas oriundas da superfície corroída a ser recuperada.

- Desenvolver estudos de aplicação do MIG CA em diversas posições de soldagem, para viabilizar a soldagem orbital de dutos em operação.
- Avaliar os efeitos da redução de aquecimento produzida pela soldagem MIG CA na soldagem de dutos com revestimentos poliméricos, que estão sujeitos à deterioração devido ao aquecimento.
- Desenvolver a tecnologia de brazagem MIG CA de chapas finas, avaliando os aspectos térmicos e de deformação resultantes. O estudo deve estabelecer parâmetros de comparação com a brazagem MIG. Devem ser considerados os principais materiais de adição usados, geralmente a base de cobre, para os quais não foi avaliada a aplicação do MIG CA.
- Reavaliar a utilização da forma de onda de corrente com base positiva após o pulso de corrente, sugerida por Nascimento et al (2007) e Tong et al (2001), aceita como uma condição mais favorável à transferência metálica sem repulsão e sem respingos, de forma a identificar as condições que demandam este recurso.
- Desenvolver forma de onda de corrente MIG CA que promova a redução da energia cinética da gota, dentro de limites aceitáveis de repulsão da gota. Pode ser utilizada uma rampa de corrente na fase negativa, ou seja, iniciar o negativo com corrente baixa para reduzir o efeito repulsivo, e desacelerar a gota progressivamente com o aumento da corrente, o que deve promover também a escalada progressiva do arco.
- Avaliar a viabilidade do uso de pulsos de corrente sincronizados com a oscilação da gota para promover o destacamento com menores níveis de corrente de pulso.

CAPÍTULO 9

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BÁLSAMO, P.S.S.; VILARINHO, L. O.; SCOTTI, A. Determinação Criteriosa dos Parâmetros de Pulso para Soldagem MIG Pulsada em Alumínio e Aço Inoxidável. **Anais do XXV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem**, Belo Horizonte MG: ABS, 1999. CD-ROM.
- BÖHME, D.; ROSENFELD, W.; BAUM, L.; CRAMER, H. Mig-Welding of Very Thin Al-Sheets by A.C. Pulsed Arc. **International Institute of Welding IIW**, doc. XII-1720-02, 2002.
- BRUCE, W.A.; Welding onto In-Service Thin Wall Pipelines, **Final Report – EWI**, Project No. 41732CAP to PRC International, July 2000.
- CHOI, S.K.; YOO, C.D; KIM, Y.S. The Dynamic Analysis of Metal Transfer in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding. **J. Phys. D: Appl. Phys.**, 31, p. 207-215, 1998.
- ESSERS, W.G.; GOMPEL, M.R.M.V. Arc Control with Pulsed GMAW Welding. **Welding Journal**, USA, p. 26-32, June, 1984.
- ESSERS, W.G. and WALTER, R. Some Aspects of the Penetration Mechanisms in Metal-Inert-Gas (MIG) Welding. **Arc Physics and Weld Pool Behaviour**, p. 289-300, 1979.
- 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 da Solda. **Soldagem & Inspeção**, v. 10, nº 4, p. 173-181, 2005.
- FARSON, D.; CONRARDY, C.; TALKINGTON, J.; BAKER, K.; KERSCHBAUMER, T. and EDUWARDS, P., Arc Initiation in Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**, USA, v. 77, p.315-321, Aug. 1998.
- GLICKSTEIN, S. S. Arc Modelling for Welding Analysis. **Arc Physics and Weld Pool Behaviour**, p. 1-16, 1979.
- GOHR Jr., R. **Novos métodos de controle da soldagem MIG/MAG**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2002.
- GUILE, A. E. Processes at Arc Cathode Roots on Nonrefractory Metal Having Films of Their Own Oxide. **Arc Physics and Weld Pool Behaviour**, p.79-86, 1979.
- Haidar, J. An Analysis of the Formation of Metal Droplets in Arc Welding. **J. Phys. D: Appl. Phys.**, 31, p. 1233-1244, 1998.
- Haidar, J. and LOWKE, J.J. Predictions of Metal Droplet Formation in Arc Welding. **J. Phys. D: Appl. Phys.**, 29, p.2951-2960, 1996.

- HALMOY, E. Wire Melting Rate, Droplet Temperature, and Effective Anode Melting Potential. **Arc Physics and Weld Pool Behaviour**, p. 49-57, 1979.
- HARRIS, I.D. Arc Welding Automotive Aluminum. **Advanced Materials & Processes**. V. 159, p. 52, Sep. 2001.
- HARWIG, D.D. **Arc Behavior and Transfer in the VP-GMAW Process**. Phd Dissertation, School of Industrial and Manufacturing Science, Cranfield University, 2002.
- HARWIG, D.D.; DIERKSHEIDE, J.E.; YAPP, D.; BLACKMAN, S. Melting Rate Analysis of the VP-GMAW Process. **Cooperative Research Program- EWI**, Summary Report SR0228, December, 2002.
- HARWIG, D.D.; DIERKSHEIDE, J.E.; YAPP, D.; BLACKMAN, S. Droplet Burnoff Rate Measurements on the VP-GMAW Process. **International Institute of Welding IIW**, doc. XII-1858-05, 2005.
- HILTUNEM, V.; PIETIKÄINEN, J. Investigations and Observations on Material Transfer in Metal-Inert-Gas (MIG) Welding. **Arc Physics and Weld Pool Behaviour**. p. 147-163, 1979.
- JONES, L.A.; EAGAR, T.W.; LANG, J.H. Magnetic Forces Acting on Molten Drops in Gas Metal Arc Welding. **J. Phys. D: Appl. Phys**, 31, p. 93-106, 1998.
- JONES, L.A.; EAGAR, T.W.; LANG, J.H. A Dynamic Model of Drops Detaching from a Gas Metal Arc Welding. **J. Phys. D: Appl. Phys**, 31, p. 107-123, 1998.
- JOSEPH, A.; WEBB, C.; HARAMIA, M.; YAPP, D. Variable Polarity Improves Weld Brazing of Galvanized Sheet. **Welding Journal**, USA, p.36-40, October, 2001.
- KIYOHARA, M.; YAMAMOTO, H.; HARADA, S. Melting Characteristics of a Wire Electrode in the MIG-Welding of Aluminium, **Arc Physics and Weld Pool Behaviour**, p. 165-175, 1979.
- LANCASTER, J. F. Metal Transfer in Fusion Welding, **Arc Physics and Weld Pool Behaviour**, p. 135-146, 1979.
- LOCATELLI, G. **Uma Ferramenta Computacional para o Controle de Processo de Soldagem a Arco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2007.
- LOCATELLI, G., Silva, R.H.G. **Determinação das curvas de igual consumo MIG do Alumínio ER-4043 e do aço ER-70S6**. Relatório interno - LABSOLDA, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2005.
- MODENESI, P.J.;NIXON, J.H. Arc Instability Phenomena in GMA Welding, **Welding Journal**, USA, p. 219-224, September, 1994.

- MULLIGAN, S.J. Pulsed MIG Arc Welding Processes for Joining of Thin Sheet Aluminium. **The Welding Institute – TWI**, July, 2003.
- NASCIMENTO, A.S.; FERNANDES, D.B.; VILARINHO, L.O. **Anais do XXXIII Consolda – Congresso Nacional de Soldagem**, Caxias do Sul RS: ABS, 2007. CD-ROM.
- NEMCHINSKY, V.A. The Effect of the Type of Plasma Gas on Current Constriction at the Molten Tip of an Arc Electrode. **J. Phys. D: Appl. Phys**, 29, p. 1202-1208, 1996.
- NEMCHINSKY, V.A. Heat Transfer in Liquid Droplet Hanging at the Tip of an Electrode During Arc Welding. **J. Phys. D: Appl. Phys**, 30, p. 1120-1124, 1997.
- NEMCHINSKY, V.A. The Rate of Melting of the Electrode During Arc Welding. The Influence of Discrete Removal of the Melt. **J. Phys. D: Appl. Phys**, 31, p. 1565-1569, 1998.
- NEMCHINSKY, V.A. Heat Transfer in an Electrode During Arc Welding with a Consumable Electrode. **J. Phys. D: Appl. Phys**, 31, p. 730-736, 1998.
- NEMCHINSKY, V.A. Electrode Melting during Arc Welding with Pulsed Current. **J. Phys. D: Appl. Phys**, 31, p. 2797-2802, 1998.
- PAES, M.T.P.; POPE, A.M.; SOUZA FILHO, B.G. Soldagem em Operação de Dutos e Tubulações Revisão do Estado da Arte. **I ENSOLDA – I Encontro Técnico de Soldagem (Petrobras)**, 2004.
- POPE, A.M.; PAES, M.T.P.; SOUZA FILHO, B.G. Soldagem em Operação de Dutos sem Fluxo Interno. **I ENSOLDA – I Encontro Técnico de Soldagem (Petrobras)**, 2004.
- QUITES, A.M.; DUTRA, J.C. **Tecnologia da Soldagem a Arco Voltáico**. Florianópolis: EDEME, 1979. 248 p.
- REHFELDT, D.; BREMER, C., Untersuchungen zum Zündverhalten und zur Prozeßqualität beim Metall-Inertgasschweißen von Aluminiumlegierungen, **Schweißen und Schneiden**, v. 45, H. 1, S. 26-31, Jan. 1993.
- RODRIGUES, C.E.A.L. **Avaliação Cinemática e Dinâmica da Transferência Metálica da Soldagem MIG/MAG**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 2007.
- SANTOS, T.F. **Estudo Sobre a Abertura e Estabilidade do Arco MIG na Soldagem do Alumínio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2000.
- SHELLHASE, M.; WEINSCHENK, H.E. Dynamic Behaviour of Consumable Metal Arcs. **Arc Physics and Weld Pool Behaviour**, p. 59-66, 1979.

- SENSARC AL350 Penetration-controllable MIG Welding Power Source. **Technical report – Factory Automation & Robotics Group, Kobelco**, 1992.
- SIMPSON, S.W.; ZHU, P. Formation of Molten Droplets at a Consumable Anode in an Electric Welding Arc. **J. Phys. D: Appl. Phys**, 28, p. 1594-1600, 1995.
- SOUZA, D.; ALVES, A.R.; SCOTTI, A. Um Modelo Qualitativo Para Explicar a Influência da Polaridade na Taxa de Fusão no Processo MIGMAG. **Anais do 4º COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia da Fabricação**, Estância de São Pedro SP, Abril, 2007. CD ROM.
- SUBRAMANIAN, S.; WHITE, D.R.; SCHOLL, D.J.; WEBER, W.H. In Situ Optical Measurement of Liquid Drop Surface Tension in Gas Metal Arc Welding. **J. Phys. D: Appl. Phys**, 31, p. 1963-1967, 1998.
- TALKINGTON, J. E. **Variable polarity gas metal arc welding**. Dissertação, The Ohio State University. 1998.
- TONG, H.; UEYAMA, T.; HARADA, S.; USCHIO, M. Quality and Productivity Improvement in Aluminium Alloy Thin Sheet Welding Using Alternating Current Pulsed Metal Inert Gas Welding System. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 6, p. 203-208. 2001.
- TONG, H.; UEYAMA, T. Improvement of Al Alloy Sheet Metal Welding Quality and Productivity with AC Pulsed MIG Welding System (Report 1). **Journal of Light Metal Welding and Construction**, v. 39, p. 14-19, 2001.
- TONG, H.; UEYAMA, T. Improvement of Al Alloy Sheet Metal Welding Quality and Productivity with AC Pulsed MIG Welding System (Report 2). **Journal of Light Metal Welding and Construction**, v. 39, p. 22-28, 2001.
- VILARINHO, L. O.; SCOTTI, A. Um Algoritmo Não Linear para Controle Sinérgico de Equipamentos para Soldagem MIG Pulsada de Alumínio. **Anais do 1º COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia da Fabricação**, Curitiba PR, Abril, 2001. CD ROM
- WANG, Q.L.; LI, P.J. Arc Light Sensing of Droplet Transfer and its Analysis in Pulsed GMAW Process. **Welding Journal**, USA, p.458-469, November. 1997.
- WASZINK, J.H.; VAN DEN HEUVEL, J.P.M. Heat Generation and Heat Flow in the Filler Metal in GMA Welding, **Welding Journal**, USA, p.269-282, August, 1982.
- WOHLFAHRT, H.; THOMAS, K.; WIESNER, S. Welding-Voltage Measurements During TIG and MIG Welding with the Objective of Controlling the Weld Penetration. **Welding & Cutting**, 53, nº2, 2001.

- WU, C.S. CHEN, M.A. LI, S.K. Analysis of Excited Droplet Oscillation and Detachment in Active Control of Metal Transfer. **Computational Materials Science**, v. 31, p. 147–154, 2004.
- YOO, C.D.; YOO, Y.S.; SUNWOO, H-K. Investigation on Arc Light Intensity in Gas Metal Arc Welding. Part 1: Relationship Between Arc Light Intensity and Arc Length. **Proc. Instn. Mech Engrs.** v. 211, Part B, p. 345-353, 1997.
- ZHANG, Y.M.; KOVACEVIC, R. Active Metal Transfer Control by Monitoring Excited Droplet Oscillation. **Welding Journal**, USA, p.388-395, September, 1998.
- ZHENG, B.; KOVACEVIC, R. A Novel Control Approach for the Droplet Detachment in Rapid Prototyping by 3D Welding. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 123, p. 348-355, May, 2001.
- ZHIMING, O.; Al-Erhayem, O. Feedbacksteuerung zum metall-schutzgasschweißen mit impulslichtbogen, **Schweißen und Schneiden**, 41- 1989.
- ZHU, P.; RADOS, M.; SIMPSON, S. W., Theoretical Predictions of the Start-Up Phase in GMA Welding, **Welding Journal**, USA, p. 269-274, Jul. 1997.