

IAROSLAV SKHABOVSKIYI

**MIG/MAG RSSP (COM REVERSÃO SINCRONIZADA
DO SENTIDO DA TOCHA E DA POLARIDADE)
VISANDO AUTOMAÇÃO DE SOLDAGEM DO PASSE
DE RAIZ EM TUBULAÇÕES**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2014

IAROSLAV SKHABOVSKIY

**MIG/MAG RSSP (COM REVERSÃO SINCRONIZADA
DO SENTIDO DA TOCHA E DA POLARIDADE)
VISANDO AUTOMAÇÃO DE SOLDAGEM DO PASSE
DE RAIZ EM TUBULAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Américo Scotti

Co-orientador: Prof. Dr. Ruham Pablo Reis

UBERLÂNDIA – MG

2014

IAROSLAV SKHABOVSKIY

**MIG/MAG RSSP (COM REVERSÃO SINCRONIZADA
DO SENTIDO DA TOCHA E DA POLARIDADE)
VISANDO AUTOMAÇÃO DE SOLDAGEM DO
PASSE DE RAIZ EM TUBULAÇÕES**

Dissertação **APROVADA** pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Banca Examinadora:

Prof. Américo Scotti (PhD) – UFU – Orientador

Prof. Ruham Pablo Reis (Dr.) – UFU – Co-orientador

Prof. Louriel Oliveira Vilarinho (PhD) – UFU

Prof. Volodymyr Ponomarov (PhD) – UFU

Dr. Giovanni Dalpiaz (Dr. Eng.) – Petrobrás – RS

Uberlândia, Fevereiro de 2014

S627m Skhabovskyi, Iaroslav, 1989-
2014 MIG/MAG RSSP (com reversão sincronizada do sentido da tocha e da polaridade) visando automação de soldagem do passe de raiz em tubulações / Iaroslav Skhabovskyi. - 2014.
155 f. : il.

Orientador: Américo Scotti.
Coorientador: Ruham Pablo Reis.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem - Teses. I. Scotti, Américo, 1955- II. Reis, Ruham Pablo, 1979- III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

*Aos meus pais, Galina e Vitalii.
À minha irmã, Irina.
À minha namorada, Raiana.
À toda minha família.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Américo Scotti, pelo exemplo de trabalho, pela oportunidade que me foi dada e por ser um ótimo pesquisador e professor;

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Ruham Pablo Reis, pela orientação, ensinamento, amizade e, acima de tudo, pela credibilidade e paciência;

À minha namorada, Raiana Roland Seixas, por estar ao meu lado durante todo este período, pelo apoio e pela compreensão;

Aos Prof. Volodymyr Ponomarov, Prof. Louriel Oliveira Vilarinho, Prof. Valtair Antonio Ferraresi pelos ensinamentos na área de soldagem;

Ao programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU pela oportunidade;

Às colegas Carolina Mota e Marcos Vinícius, pela confecção da interface e modernização da programação da mesa coordenada para permitir programar maiores distâncias de trajetórias desejadas;

À CAPES pelo suporte financeiro (bolsa);

À Fapemig, pelo suporte financeiro para desenvolvimento da pesquisa, através do projeto Grupo para Desenvolvimento e Fabricação de Dutos: Fabricação e Manutenção de Mineriodutos por Técnicas Modernas e de Alta Produtividade, Edital 01/2010 - FAPEMIG/FAPESP/FAPESPA/VALE S.A, Processo RDP-00140-10;

Ao Laprosolda/UFU pelo apoio técnico e laboratorial;

Aos amigos do Laprosolda, pelo apoio, dicas e amizade;

E a todos que de uma forma ou outra contribuíram para a minha formação profissional, acadêmica e pessoal.

SKHABOVSKIY, I. **MIG/MAG RSSP (com Reversão Sincronizada do Sentido da Tocha e da Polaridade) Visando Automação de Soldagem do Passe de Raiz em Tubulações.** 2014. 155 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

Uma das maiores preocupações em relação à soldagem automatizada (mecanizada) de passes de raiz é a robustez da geometria do cordão frente aos parâmetros e condições operacionais utilizados. Um soldador especializado é capaz de controlar a poça a partir de informações visuais, independentemente das variações na abertura de raiz e/ou a falta de alinhamento dos chanfros. No entanto, não existe um conjunto sensor e atuador que possa imitar a capacidade do soldador em identificar as condições da poça e deslocar o arco para enfrentar as eventuais anormalidades presentes nas soldagens automatizadas. Uma solução para evitar problemas típicos do passe de raiz (perfurações, por exemplo) é a utilização de cobrejunta. Todavia, este recurso eleva o custo e tempo de produção. Assim, para conceber a soldagem automática de passes de raiz seria necessário desenvolver um processo/técnica suficientemente robusto para manter a poça estável mesmo com variações geométricas (desnívelamento das superfícies e desalinhamento das faces da junta) nos chanfros. Desta forma, a soldagem de tubulações/dutos poderia ser feita em menor tempo e custo. Assim, o objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento e avaliação, de forma original, de uma técnica de soldagem GMAW baseada no controle do tipo de corrente e movimento da tocha, a fim de conter o colapso da poça sob diferentes tolerâncias geométricas de preparação da junta. Para isso, foi usada uma fonte especial de soldagem comandada por sensores de movimento para sincronizar um tipo de modo operacional do processo à posição do arco na junta (laterais e centro do chanfro). Para permitir uma melhor distribuição de calor na junta, o passe sobre as laterais do chanfro foi realizado com polaridade CC+ em modo pulsado (mais calor imposto) e o passe central foi executado com polaridade CC- em modo corrente contínua ou Curto-Circuito Controlado (menor calor imposto e pressão do arco). Buscou-se verificar os parâmetros que influenciam no acabamento de solda e estabilidade desta técnica. Os resultados mostram a viabilidade da técnica para soldagem automatizada de passes de raiz na posição plana com variação da abertura de raiz (folga) de $\pm 0,5$ mm e de desnívelamento (*high-low*) de até 3 mm.

Palavras-Chave: Controle da poça de fusão, *Switch-back*, GMAW, Passe de raiz, Tubulações, Dutos

SKHABOVSKIY, I. **GMAW SRDP (with Synchronized Reversal of Direction of Torch and Polarity) Seeking Automation of Root Pass in Pipelines.** 2014. 155 f. MSc. Thesis, Federal University of Uberlândia, MG, Brazil.

ABSTRACT

One of the biggest concerns in automated (mechanized) welding of root passes is the robustness of bead geometry in response to utilized parameters and operational conditions. Skilled welder is able to control the weld pool from visual information, regardless of variation in the root opening (gap) and/or misalignment in the groove. However, there is no sensor and actuator capable of mimicking the ability of the welder to identify the condition of the pool and move the arc to face anomalies present in automated (mechanized) welding. One solution to avoid the typical problems of the root pass (burn-through, for example) is the use of backing. However, this feature increases the cost and production time. Thus, to accomplish automatic welding of root passes it would be necessary to develop a process/technique robust enough to maintain a stable pool even with geometric variations (high-low and misalignment of the joint faces) on the grooves. Then, pipe welding could be carried out with less time and cost. Thus, the objective of this work is to innovatively develop and evaluate, in an original manner, a GMAW technique based on the control of the type of current and torch motion, in order to prevent the collapse of the weld pool under different geometric tolerances of joint preparation. For this, a particular welding power source controlled by motion sensors for synchronizing a type of operating mode of the process with the position of the arc in the joint (sides and center of the groove) was used. To allow a better distribution of heat in the joint, a welding pass was made on the sides of the groove with DCEP polarity pulsed (more heat input) and a central pass was performed with DCEN polarity in constant current mode or Short Circuit Controlled DCEN polarity (less heat input and arc pressure). The evaluation of this process involved verification of parameters affecting weld bead visual quality and process stability. The results show the feasibility of the technique for enabling automatic welding of root passes in the flat position with variations of the root opening (gap) of ± 0.5 mm and with high-low up to 3 mm.

Keywords: Weld pool control, Switch-back, GMAW, Root pass, Pipelines, Piping

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Amplitude de movimento transversal da tocha;
Ad	Área de metal depositado;
APSTT	Alternância de Polaridade Sincronizada com Tecimento Transversal
AWS	American Welding Society;
C	Comprimento do cordão de solda;
CC-	Eletrodo negativo;
CC+	Eletrodo positivo;
CCC	Curto-Circuito Controlado;
CCC-	CCC em polaridade negativa;
D	Receptor;
DBCP	Distância bico de contato-peça;
DCEN	<i>Direct Current Electrode Negative;</i>
DCEP	<i>Direct Current Electrode Positive;</i>
del	Diâmetro do arame-eletrodo;
E	Emissor;
f	Folga (agertura de raiz);
Fel	Força devida à pressão causa pelo campo eletromagnético;
FEp	Fator Energético ponderado
Fg	Força da gravidade;
F _y	Força devido à tensão superficial;
F _m	Força devido ao momentum das gotas impingentes;
f _p	Frequência de pulsos;
F _p	Força do jato de plasma;
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding;</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding;</i>
I	Corrente de soldagem;
I _b	Corrente de base;
IIW	<i>International Institute of Welding;</i>
I _m	Corrente média;
I _m -	Corrente média na polaridade negativa;
I _m +	Corrente média na polaridade positiva;
I _p	Corrente de pulso;
L	Passe da trajetória por curso;
La	Comprimento de arco;
Laprosolda	Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem;
MIG/MAG	<i>Metal Inert Gas / Metal Active Gas;</i>
RMD	<i>Regulate Metal Deposition;</i>

RSSP	Reversão Sincronizada do Sentido da Tocha e da Polaridade;
S	Sobreposição da trajetória de movimento da tocha;
Sa	Área transversal do arame-eletrodo;
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i> ;
SRDP	<i>Synchronized Reversal of Direction of Torch and Polarity</i> ;
STT	<i>Surface Tension Transfer</i> ;
t-	Tempo na polaridade negativa;
t+	Tempo na polaridade positiva;
tb	Tempo de base;
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i> ;
tp	Tempo de pulso;
Ua	Tensão de arco;
UFU	Universidade Federal de Uberlândia;
UGPP	Uma Gota Por Pulso;
USB	<i>Universal Serial Bus</i> ;
Valim	Velocidade de alimentação do arame-eletrodo;
Valim-	Velocidade de alimentação na polaridade negativa;
Valim+	Velocidade de alimentação na polaridade positiva;
Valimap	Velocidade de alimentação aparente;
Veq	Velocidade equivalente de soldagem;
VeqCC-	Velocidade equivalente no meio da junta;
Vs	Velocidade de soldagem;
Vt	Velocidade da tocha (programada);
VtCC-	Velocidade da tocha no meio da junta;
VtCC+	Velocidade da tocha nas laterais da junta;
Vud	Volume unitário depositado;

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	– Exemplos de acopladeiras internas (“pigs”) (adaptado de ADAMS; MAYER, 1952; LAMAR, 1969; REGINALD, 1972; JONES, 1952)	6
Figura 2.2	– Exemplos de acopladeiras externas (adaptado de ROGERS, 1968; BARRY, 1969; LEON, 1970; CLARC, 1975)	6
Figura 2.3	– Os exemplos de acopladeiras internas ou popularmente como “pigs” com cobrejuntas (adaptado de JOHN; ERVAN, 1965; ROBERT; JOHN, 1972; CUNNINGHAM; WHITE, 1976; LEDUC, 1994)	7
Figura 2.4	– a) vista geral da máquina interna para soldagem tubulações/dutos de acordo com a patente <i>US 5597108 (A)</i> ; b) vista ilustrativa da parte central da máquina, onde (110) representa o cobrejunta expansível por um mecanismo hidráulico (DIERLAM, 1997)	8
Figura 2.5	– Ilustração de equipamento da patente <i>US 5583305 (A)</i> , onde (12) e (14) são os tubos a ser unidos de topo, (16) é o chanfro para união, (28) é o mecanismo para fixação o equipamento dentro de tubos, (44) é uma base rotacional, (40) é a câmara de filmagem ou de um objeto de ensaio não destrutivo e (42) são as lâmpadas para iluminar passe de raiz de lado inteiro (HIRSCH; PILLARD, 1996)	9
Figura 2.6	– Ilustração de montagem dos elementos principais do método de soldagem da patente <i>JPH 03180275 (A)</i> (YUJI; TADASHI, 1991)	9
Figura 2.7	– Ilustração da configuração da junta na soldagem duplo tubos da patente <i>JPH 03207575 (A)</i> , onde (1) e (1') são os tubos externos (ver qual a diferença entre 1 e 2), (3) é o tubo interno, (tente me mostrar a diferença entre 3, 3', 4 e 4') (4) é o espaçamento entre as paredes do tubo na região da solda, (5) é o cordão de solda que liga os tubos interno, (6) é o passe de raiz da união entre os tubos externo, (7) são os cordões de enchimento e acabamento e (t) é a folga entre tubo externo e inteiro (TAKESHI; TERUHIKO, 1991)	10
Figura 2.8	– Forma de onda da corrente de soldagem da patente <i>US 2009/0321402 (A1)</i> com comportamento do metal depositado (DOYLE et al., 2009)	12
Figure 2.9	– Ilustração do sistema de soldagem orbital da patente <i>WO 1998015378 (A1)</i> com seus elementos principais, onde (10) e (12) são os tubos, (14) é o trilho do tipo cinta, (16) é a máquina de soldagem (trator com oscilador), (18) é o motor de deslocamento da	13

- máquina de soldagem, (24) é o motor do alimentador de arame-eletrodo e (31) é a fonte de soldagem STT (PARKER, 1998)
- Figura 2.10 – Elementos principais do sistema para monitorar e controlar a transferência metálica da patente US 7271365 (B2), onde (112) é o alimentador do arame-eletrodo, (110) é o sistema para monitorar e controlar a energia aplicada na poça de fusão, (120) é a fonte de soldagem especial, (122) é o sensor de tensão do arco e (124) é sensor da corrente de soldagem do tipo “shunt”, (130) é o controlador, (E) é o arame-eletrodo, (WP) é o arco elétrico e (W) é a peça soldada (STAVA; MYERS, 2007) 14
- Figura 2.11 – Esquema de equipamento utilizado na patente US 3668360 (A) com seus elementos principais, onde (11) e (12) são os tubos a serem soldados, (13) é o chanfro da junta, (14) é a tocha, (15) é o suporte para movimentar orbitalmente a tocha, (18) é o arame-eletrodo, (21) é o cilindro de gás de proteção, (24) é a fonte do tipo tensão constante, (25) é a fonte do tipo corrente contínua e (27) é o cobrejunta (WILLIAM, 1972) 15
- Figure 2.12 – Característica e estática de regulação dos parâmetros da fonte tensão constante da patente US 3668360 (A), onde (F_n onde $n = 1, 2, 3, n$) é a velocidade de alimentação, (P) é o nível de tensão regulado na fonte, (Q_n onde $n = 1, 2, 3, n$) são os pontos de trabalho e (Z_n onde $n = 1, 2, 3, n$) são os comprimentos do arco elétrico (WILLIAM, 1972) 16
- Figura 2.13 – Esquema de máquina para soldagem automatizada com mecanismo de tecimento transversal da patente US 1667585 (A) (VERNI, 1928) 18
- Figura 2.14 – Trajetórias de tecimento transversais da patente US 1667585, onde o percurso da parte esquerda (Fig. 4) é o caminho dos sistemas antes da invenção e o percurso da parte direita (Fig.5) é o aperfeiçoado em relação ao precursor (VERNI, 1928) 18
- Figura 2.15 – Trator com duas tochas para soldagem de passes de raiz pela patente US 6429405 (B2) com seus elementos principais, onde (1) é o arame-eletrodo, (2) e (4) são os tubos, (3) é o cordão de solda, (28) é o chanfro e (101) são as tochas (BELLONI; BONASORTE, 2002) 19
- Figura 2.16 – Bloco-diagrama de controle de posição da máquina e sua tocha de soldagem pela patente US 6429405 (B2) com seus elementos principais, onde (1) é a tocha, (15) é o elemento de medição da 20

impedância do arco elétrico, (16) é o filtro responsável pelo chanfro direito da junta, (18) é o filtro responsável pelo chanfro esquerdo da junta, (19) é o diferenciador que indica (calcula) a posição do arco dentro do chanfro, (20) é o integrador, (21) é o amplificador (“*gain unit*”) do sinal, (22) é o amplificador, (23) é o elemento de acionamento, (24) é o central regulador do sistema que movimenta a tocha e (25) é o cabo (BELLONI; BONASORTE, 2002)

- Figura 2.17 – Seção transversal da tocha com seus elementos principais pela patente *US 4295031 (A)*, onde (2) representa o sentido do tecimento transversal linear, (10) o carretel de arame-eletrodo, (11) arame-eletrodo, (12) alimentador de arame por motor elétrico, (13) bico de contato, (14) tubo condutor de eletricidade para guiar o arame, (15) pinos de articulação pendular do tubo guia, (16, 17 e 18) composição do eletroímã (ROEN, 1981) 21
- Figura 2.18 – Princípio de realização do método de soldagem da patente *US 5202546 A*, onde (1) e (3) são as partes que foram sodadas, (2) é o passe de ancoramento, (3a) é o chanfro e (4) é o passe de raiz (HASEGAWA et al., 1993) 22
- Figura 2.19 – Esquema do método de preparação da junta para soldagem dos tubos de um lado (sequência da esquerda para direita) da patente *JP2003048067 (A)* com seus elementos principais, onde (1) e (2) são os tubos, (9) passes de selamento, (10) é o chanfro, (1A) é a espessura de tubo e (1G) é a folga (MASAKATSU; SHUNJI, 2003) 23
- Figura 2.20 – Esquema do método de soldagem dos tubos de um lado (sequência da direita para esquerda) da patente *JP2003048067 (A)* (MASAKATSU; SHUNJI, 2003) 23
- Figura 2.21 – Esquema ilustrativa do princípio de método, com seus elementos principais, da patente *US 4223197 (A)* (CHIBA et al., 1980) 24
- Figura 2.22 – Ilustração do esquema do processo com seus elementos principais da patente *JPS58154487 (A)*, onde (1) é o metal de base (tubo), (6) é o passe de raiz, (7) é o passe de enchimento, (8) é o mecanismo de refrigeração dos passes de enchimento, (8a) e (8b) são os furos para pulverizar líquido para zonas de solda, (8c) é o tubo para fornecer líquido e (8d) são os suportes de mecanismo (RIYOUICHI; SUTETO; KIYOSHI, 1982) 24
- Figura 2.23 – Ilustração de princípio do método de patente *JPS5550974 (A)* e seus 25

elementos principais, onde (1) é o metal de base (tubos), (2) é o cordão de solda, (3) é a tocha TIG, (4) é o eletrodo de tungstênio, (5) é o gás de proteção, (13) é a mangueira com gás de injeção, (14) é o fluxo de gás de injeção e (15) é a poça de fusão (MOTOJI; SATOSHI, 1980)

- Figura 2.24 – Ilustração do processo de soldagem da patente *JPS5741886 (A)* com seus elementos principais, onde (1) é a tocha TIG, (2) é o metal de adição, (3) é o tubo a ser soldado, (4) é o chanfro de tubo, (5) é o eletrodo de tungstênio, (6) é a região da junta, (7a e 7b) são as laterais fundidas do chanfro (TAKAO; KUNIO, 1982) 26
- Figura 2.25 – Sistema de auto controle e ajuste dos parâmetros de soldagem pela impedância da patente US 6518545 (B1), com seus elementos principais, onde (10) é a máquina de solda, (11) é a tocha de soldagem, (12) é o tubo a ser soldado, (14) é a fonte de energia, (15) é o alimentador de arame-eletrodo, (16) é o oscilador da tocha, (25) é o arame-eletrodo, (26) é o arco elétrico, (30) é o conversor analógico-digital da corrente e tensão do arco, (31) é o software com equação, (32) é o software com equação e relógio regressivo para calcular segunda vez o valor da impedância, (33) é o software com equação, para calcular segunda vez a impedância, (34) é o conversor digital-analógico do índice calculado, (35) é o processador de autocontrole (EEPROM), (36) é o computador com a base dos parâmetros padrões e (70) é o sistema computacional que calcula a variação da impedância (RICHARD; RICHARD, 2003) 27
- Figura 2.26 – Princípio de funcionamento do controle da penetração da patente US 4733051 (A), onde (14 e 14') são os tubos a serem soldados, (18) é a tocha de soldagem, (22) é o arame-eletrodo, (24) é a poça de fusão, (70) é o computador de controle, (80) é o arco elétrico e (96) é a estação de soldagem que inclui a câmera (60) (FAFARD et al., 1988) 28
- Figura 2.27 – Vista de equipamento de acordo com a patente US 4733051 (A), cujos elementos principais são os tubos a ser soldado (14) e (14'), as tochas de soldagem (18) e (18'), o cabeçote para rotacionar os tubos (32), a câmera de vídeo do tipo CID (Charge-injection Imaging Device) (60), (A), (B) e (C) são as trajetórias das partes moveis do equipamento e (β) é o ângulo de inclinação do sensor visual em relação da poça de fusão (FAFARD et al., 1988) 29

- Figura 2.28 – Condições de variação de folga durante a soldagem e suas consequências, sendo as figuras à esquerda o comportamento da solda sem o uso da técnica e à direita com o uso da técnica, e as figuras de cima com folga pequena e as de baixo com folgas grandes (STAVA; HSU; NICHOLSON, 2006) 30
- Figura 2.29 – Princípio do método de soldagem da patente *EP1036627 (B1)*, onde (320) e (322) são os chanfros da junta, (402) é a poça de fusão, (410) são os tecimentos pendulares da tocha, (P1) e (P2) são metais de base (tubos), (I0) é o arame-eletrodo, (I4) é a tocha, (SO) é o comprimento do eletrodo “*stick-out*” (STAVA; HSU; NICHOLSON, 2006) 31
- Figura 2.30 – Ilustrações do método da patente *US 4142085 (A)* e da geometria da junta aplicável com seus elementos principais, onde (1) e (2) são os tubos a serem soldados, (25) é a unidade de ativação ajustável (ANDERSSON; KNIPSTROM; MALM, 1979) 32
- Figura 2.31 – Sequência de deposição dos passes de soldagem da patente *US 4142085 (A)*, onde (7) é o passe de raiz, (8) é o passe de enchimento, (9) é o passe de enchimento, (10), (11), (12) e (13) são os passes de acabamento (ANDERSSON; KNIPSTROM; MALM, 1979) 33
- Figura 2.32 – Ilustração esquemática de máquina de soldagem automática utilizada na patente *US 5030812*: (1) – máquina de soldagem; (12) – trilho de guia, onde anda a máquina; (10) – superfícies dos tubos; (2) – tocha de soldagem fixada na máquina de soldagem; (3) – motor para rotação da tocha; (14) – chanfro; (7) – arame-eletrodo; (16) – cobrejunta, que não se funde (MURAYAMA; SUGITANI, 1991) 34
- Figura 2.33 – Esquema básico de sistema robótico projetado para soldagem orbital de tubulações/dutos da patente *WO 2006/037200 (A1)*, onde a) o sistema está montada no tubo, b) os elementos (blocos) principais do sistema inventada, onde (1) é são manipuladores, (2) é o sistema de comando, (3) é a fonte com os alimentadores de arame-eletrodo e (4) é o tubo (BRACARENSE et al., 2006) 35
- Figura 2.34 – Ilustrações da patente *US 7525067 (B2)*: a) tocha de soldagem duplo arame; b) princípio de funcionamento com seção transversal do bico de contato especial; c) princípio do sistema para girar e inclinar os arames-eletrodos com seus elementos principais, onde (211) é o grampo “*clamp*”, (213) é a tocha de soldagem (230) são guias dos 36

	arames-eletrodos, (260) são os arames-eletrodos e (θ_3) é o ângulo de inclinação dos arames-eletrodos (adaptado de DIEZ et al., 2009)	
Figura 3.1	– Figura 3.1 – (A) Formação inicial da poça de fusão, sob a ação do arco ($F_\gamma = F_p + F_{el} + F_m + F_g$); (B) Finalização da formação da poça, depois que o arco tenha passado ($F_\gamma = F_g$), antes da solidificação: onde F_p = força do jato de plasma devido à pressão dinâmica causada pelo campo magnético; F_{el} = força devida à pressão estática causada pelo campo eletromagnético; F_m = força devido ao momentum das gotas impingentes; F_γ = força devida à tensão superficial; F_g = força da gravidade	39
Figura 3.2	– Esquema da sincronização do processo MIG/MAG reversão sincronização de sentido (<i>Switch-back</i>) e polaridade (CC+ nas laterais e CC- no centro da junta)	40
Figura 3.3	– Figura 3.3 – Fonte de soldagem DIGIPlus A7 da IMC Soldagem (IMC, 2012)	41
Figura 3.4	– Alimentador de arame-eletrodo STA-20 do IMC Soldagem	43
Figura 3.5	– Régua especial com elementos principais para calibração da velocidade de alimentação de arame	43
Figura 3.6	– A mesa de coordenada do tipo X-Y-R utilizada para a realização da trajetória típica <i>Switch-back</i> , onde (1) é o motor que fornece o tecimento transversal pendular (R) da tocha, (2) os motores que fornecem os movimentos lineares (X-Y), (3) a tocha automatizada (reta) de soldagem, (4) a chapa de teste, (5) o suporte especial para fixação das placas de teste e (6) um dos seis grampos para fixar as placa de teste no suporte	44
Figura 3.7	– Ilustração de calibração de velocidade na mesa de coordenada para eixo Y (mesmo princípio para eixo X)	45
Figura 3.8	– Suporte para fixação das chapas, onde (1) reguladores de nível, (2) placa de teste, (3) grampos (sargentos), (4) barras de cobre maciças (seção transversal de 22 x 22 mm), (5) conector do cabo terra e (6) reguladores de distância entre barras de cobre	47
Figura 3.9	– Placa de aquisição da <i>National Instruments</i> ® modelo NI USB-6009	48
Figura 3.10	– Elementos principais do sistema de monitoramento (interface) da tocha, sendo (1) alimentador da unidade central de controle (caixa de controle), (2) dois sensores (P2 e P4) transmissivos ópticos, modelo TCST1103, que enviam os sinais para a (3) caixa ou unidade central	49

de controle pelos (4) fios de saída dos sinais dos sensores para aquisição de dados, fio de entrada (5) dos sinais dos sensores na unidade central de controle (ACEL), fio com saída (6) para fonte de soldagem e três LED's (7) para monitorar os sensores transmissivos ópticos e os programas de soldagem

- Figura 3.11 – Sensor transmissivo ótico TCST1103: A) vista do sensor; B) esquema elétrico do sensor com emissor (E) e receptor (D) 49
- Figura 3.12 – Montagem os sensores na mesa da coordenadas, sendo (1) sensores do tipo transmissivo ótico, (2) granpos para fixação dos sensores, (3) suporte com guia de alinhamento para os sensores, (4) tampa de proteção para evitar a luz do arco, (5) lâmina de acionamento do sensor, (6) suporte para fixar as placas de teste e (7) tocha de soldagem automatizada. 50
- Figura 3.13 – Princípio de funcionamento do sistema de monitoramento da tocha e comando da fonte de soldagem 51
- Figura 3.14 – Bancada experimental: A) fonte de soldagem; B) conjunto de microprocessadores, subdividido em (1) sistema de aquisição dos sinais elétricos, (2) sistema computadorizado para comando e programação do movimento da mesa, (3) caixa de controle dos sensores; C) mesa de coordenadas, onde (1) é a tocha de soldagem, (2) é o fixador para placa de teste, (3) é o sistema dos sensores e (4) é a proteção dos sensores contra a luz do arco 51
- Figura 3.15 – Instrumentação do sistema de monitoramento e/ou controle de transferência pulsada no processo de soldagem MIG/MIG Pulsada com base na análise do sinal da luminosidade do arco (MIRANDA; SCOTTI; FERRARESI, 2007) 52
- Figura 3.16 – Sistema utilizado nos testes para verificar a transferência metálica, onde (1) é a tocha MIG/MAG automática (reta), (2) é o bocal especial da tocha com suporte para o sensor de luminosidade, (3) é o sensor de luminosidade e (4) é a placa de teste 53
- Figura 3.17 – Ilustração do sinal do sensor ótico para transferência de: (a) – “uma gota por pulso” – destacamento no início da base; (b) – “uma gota por pulso” – destacamento no final do pulso para o início da base; (c) – “duas gotas por pulso” – destacamento de uma gota no meio do pulso e uma no final do pulso para o início da base (MIRANDA; SCOTTI; FERRARESI, 2007) 53

Figura 3.18	– Ilustração das oscilogramas dos sinais do sensor óptico: A) oscilograma com UGPP no final de cada pulso; B) oscilograma sem UGPP no cada pulso	54
Figura 3.19	– Esquema do movimento da tocha lateral-lateral-centro da técnica <i>Switch-back</i> sincronizado com a polaridade do arame-eletrodo (amarelo indica polaridade CC+ e verde indica polaridade CC-)	54
Figura 3.20	– Trajetória de <i>Switch-back</i> lateral-lateral-centro aplicada nas chapas chanfradas com folga (abertura de raiz)	55
Figura 3.21	– Ordem dos passes de soldagem pela técnica <i>Switch-back</i> sincronizados com a polaridade do eletrodo	55
Figura 3.22	– Verificação de movimento da tocha: (1) tocha TIG; (2) bico de contado; (3) grafite; (4) trajetória do grafite; (5) folha milimétrica	56
Figura 3.23	– Comparação entre (A) caminho real e (B) caminho programado (teórico)	56
Figura 3.24	– Sincronização do movimento da tocha, sinais dos sensores e troca de polaridade do arame-eletrodo	57
Figura 4.1	– Mapa operacional da região de UGPP no fim de pulso para diferentes correntes médias e tempos de pulsos, para MIG/MAG Pulsado na polaridade positiva (CC+), com DBCP de 22 mm, Ar+5%O ₂ , arame-eletrodo AWS ER70S-6 de 1,2 mm e uma corrente de pulso de 250 A e tempos de base adequados para cada corrente média (ver em Tabela 4.1): a esquerda dos pontos, menos de UGPP, e a direita mais de UGPP	60
Figura 4.2	– Aspecto do cordão realizado com UGPP (uma gota por pulso) com corrente média de 100 A, com soldagem sobre chapa de aço ABNT 1020 de 3,2 mm de espessura (soldagem da esquerda para direita)	61
Figura 4.3	– Oscilogramas de corrente, de tensão e de luminosidade (para verificar a transferência das gotas) em MIG/MAG Pulsado convencional (a tensão está com valor invertido para facilitar a visualização no gráfico)	61
Figura 4.4	– Aspecto do cordão realizado com polaridade negativa (CC-) com corrente de -72 A, com soldagem sobre chapa de aço ABNT 1020 de 3,2 mm de espessura (soldagem da esquerda para direita)	62
Figura 4.5	– Oscilograma de corrente e tensão em MIG/MAG com corrente continua na polaridade CC-	63
Figura 4.6	– Oscilograma de soldagem MIG/MAG com 3,5 s na polaridade CC+ pulsado e 3,5 s na polaridade CC-	64

Figura 4.7	– Vista do cordão de solda nas duas polaridades (A) e seção longitudinal de parte do cordão (B), com soldagem sobre chapa de aço ABNT 1020 de 3,2 mm de espessura (soldagem da esquerda para direita)	64
Figura 4.8	– Esquema do movimento da tocha lateral-lateral-centro da técnica <i>Switch-back</i> sincronizado com a polaridade do arame-eletrodo (amarelo indica polaridade CC+ e verde indica polaridade CC-)	65
Figura 4.9	– Representação esquemática das placas de teste	67
Figura 4.10	– Vista de uma placa de teste, com destaque para a fixação das placas por “cachorros”: a) vista da raiz do chanfro, onde (1) é o “cachorro”, (2) pequena parte de metal para acender o arco; b) vista da face do chanfro, onde (3) é o gabarito (espaçador)	67
Figura 4.11	– Sinais de corrente de soldagem e tensão dos sensores do sistema de monitoramento da tocha do Experimento 1 (típico de todos os testes)	69
Figura 4.12	– Curva com as faixas das velocidades otimizadas para cada amplitude	70
Figura 4.13	– Áreas depositadas nas laterais da junta mais adequadas versus amplitude de movimento transversal	71
Figura 4.14	– Sinais de corrente de soldagem e tensão dos sensores do sistema de monitoramento da tocha do Experimento 23 (típico de todos os testes)	72
Figura 4.15	– Sinais de corrente de soldagem e tensão dos sensores do sistema de monitoramento da tocha do Experimento 48 (típico de todos os testes)	77
Figura 4.16	– Aspecto do cordão do Experimento 48 com MIG/MAG com técnica <i>Switch-back</i> (curso de 10 mm), com polaridade CC+ nas laterais e CC- no meio da junta: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da direita para esquerda)	77
Figura 4.17	– Aspecto do cordão do Experimento 49 com MIG/MAG com técnica <i>Switch-back</i> (curso de 10 mm), com polaridade CC+ nas laterais e CC- no meio da junta: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da direita para esquerda)	78
Figura 4.18	– Aspecto do cordão do Experimento 50 com MIG/MAG com técnica <i>Switch-back</i> (curso de 10 mm), com polaridade CC+ nas laterais e CC- no meio da junta: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	78
Figura 4.19	– Aspecto do cordão do Experimento 51 com MIG/MAG com técnica <i>Switch-back</i> (curso de 10 mm), com polaridade CC+ nas laterais e CC- no meio da junta: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem	79

	da esquerda para direita)	
Figura 4.20	– Aspecto do cordão do Experimento 52 com MIG/MAG com técnica <i>Switch-back</i> (curso de 10 mm), com polaridade CC+ nas laterais e CC- no meio da junta: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	81
Figura 4.21	– Aspecto do cordão do Experimento 53 com MIG/MAG com técnica <i>Switch-back</i> (curso de 10 mm), com polaridade CC+ nas laterais e CC- no meio da junta: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	82
Figura 4.22	– Aspecto do cordão do Experimento 54 com MIG/MAG com técnica <i>Switch-back</i> (curso de 10 mm), com polaridade CC+ nas laterais e CC- no meio da junta: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	82
Figura 4.23	– Aspecto do cordão do Experimento 54r (réplica) com MIG/MAG com técnica <i>Switch-back</i> (curso de 10 mm), com polaridade CC+ nas laterais e CC- no meio da junta: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da direita para esquerda)	83
Figura 4.24	– Oscilogramas da corrente de soldagem e do sinal do sensor de luminosidade (para verificar a transferência das gotas) em MIG/MAG Pulsado convencional	85
Figura 4.25	– Sinais de corrente de soldagem e tensão dos sensores do sistema de monitoramento da tocha do Experimento 60 (típico de todos os testes desta etapa)	86
Figura 4.26	– Mapa de qualidade dos cordões em função da velocidade equivalente de soldagem (V_{eq}), Fator Energético ponderado (FEp), volume unitário depositado (V_{ud}) e porcentagem de funcionamento do programa por ciclo de solda (CC+/CC-) para dois níveis de corrente média (100 e 130 A)	90
Figura 4.27	– Trajetória da técnica <i>Switch-back</i> utilizada	91
Figura 4.28	– Comparação dos sinais das correntes de soldagem entre os Experimentos 64 (A) (curso de 5 mm), 65 (B) (curso de 7,5 mm) e 60r (C) (curso de 10 mm)	92
Figura 4.29	– Esquema das faces de raízes de cordões com cursos de 5 (a), 7,5 (b) e 10 (c) mm	94
Figura 5.1	– Modelo da forma de onda da técnica CCC- e parâmetros invariáveis que foram utilizados neste trabalho	98

Figura 5.2	– Aspecto do cordão do Experimento 5.1 realizado sobre chapa com CCC- com corrente média igual a -72 A e velocidade de alimentação igual a 3,5 m/min (soldagem da esquerda para direita)	99
Figura 5.3	– Oscilograma da correntes e da tensão de soldagem do experimento realizado sobre chapa com CCC- com corrente média igual à -72 A e velocidade de alimentação igual à 3,5 m/min (similar ao Experimento 5.2 com a corrente média igual à -127 A e velocidade de alimentação de 3,5 m/min)	99
Figura 5.4	– Aspecto do cordão do Experimento 5.2 realizado sobre chapa com CCC- com corrente média igual à -127 A e velocidade de alimentação igual à 3,5 m/min (soldagem da esquerda para direita)	100
Figura 5.5	– Vista do cordão de solda com 3,5 s em cada polaridade (Pulsado em CC+ e CCC-) do Experimento 5.3 realizado sobre chapa (soldagem da esquerda para direita)	101
Figura 5.6	– Oscilograma da corrente de soldagem do Experimento 5.3 realizado com os dois modos operacionais (Pulsado em CC+ e CCC-)	101
Figura 5.7	– Aspecto do cordão com curso da reversão sincronizada de polaridade de 7,5 mm sem sobreposição: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	102
Figura 5.8	– Ilustração dos cordões nas laterais da junta no caso (a) sem e (b) com sobreposição na trajetória da reversão sincronizada de polaridade	102
Figura 5.9	– Trajetória da técnica MIG/MAG RSSP com sobreposição	103
Figura 5.10	– Aspecto do cordão do Experimento 86 com curso da reversão sincronizada de polaridade de 7,5 mm e com sobreposição de 2 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	104
Figura 5.11	– Oscilogramas da corrente de soldagem e dos sensores de movimento da tocha do Experimento 5.7, típico dos experimentos realizados sem CCC- (o arco foi apagado no meio da junta)	107
Figura 5.12	– Aspecto do cordão do Experimento 88 com curso de 7,5 mm, sobreposição de 2 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	109
Figura 5.13	– Aspecto do cordão do Experimento 88 (réplica) com curso de 7,5 mm, sobreposição de 2 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	109

Figura 5.14	– Aspecto do cordão do Experimento 89 com curso de 7,5 mm, sobreposição de 2 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	110
Figura 5.15	– Aspecto do cordão do Experimento 92 com curso de 7,5 mm, sobreposição de 2,5 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	110
Figura 5.16	– Aspecto do cordão do Experimento 96 com curso de 7,5 mm, sobreposição de 3,5 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	111
Figura 5.17	– Aspecto do cordão do Experimento 97 com curso de 7,5 mm, sobreposição de 3,5 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	112
Figura 5.18	– Trajetória da técnica MIG/MAG RSSP com sobreposição e desvio lateral do movimento	112
Figura 5.19	– Aspecto do cordão do Experimento 93 com desvio lateral do movimento com curso de 7,5 mm e com sobreposição de 2,5 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	114
Figura 5.20	– Aspecto do cordão do Experimento 90 com movimento de tecimento central com curso de 7,5 mm e sobreposição de 2,5 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	114
Figura 6.1	– Ilustração dos problemas de desalinhamento (folga variável) e desnivelamento (<i>high-low</i>) na soldagem de tubulações/duros	116
Figura 6.2	– Ilustração de preparação das placas de teste para experimentos com desnivelamento (<i>high-low</i>)	117
Figura 6.3	– Aspecto do cordão do Experimento 98 com desnivelamento (<i>high-low</i>) de 0 até 1,25 mm com curso da reversão (<i>Switch-back</i>) de 7,5 mm com sobreposição de 2,5 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	118
Figura 6.4	– Aspecto do cordão do Experimento 99 com desnivelamento (<i>high-low</i>) de 0 até 2,00 mm com curso da reversão (<i>Switch-back</i>) de 7,5 mm e sobreposição de 2,5 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	118
Figura 6.5	– Aspecto do cordão do Experimento 100 com desnivelamento (<i>high-low</i>) de 0 até 3,00 mm com curso da reversão (<i>Switch-back</i>) de 7,5 mm e sobreposição de 2,5 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	119

Figura 6.6	– Ilustração de preparação das placas de teste para experimentos com desalinhamento (folga variável)	120
Figura 6.7	– Aspecto do cordão do Experimento 101 com folga variável de 3,0 até 5,2 mm com curso da reversão (<i>Switch-back</i>) de 7,5 mm e sobreposição de 2,5 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	121
Figura 6.8	– Aspecto do cordão do Experimento 103 com folga constante de 3,0 mm com curso de reversão (<i>Switch-back</i>) de 7,5 mm e sobreposição de 2,5 mm e amplitude de 8 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	122
Figura 6.9	– Aspecto do cordão do Experimento 104 com folga constante de 4,5 mm com curso de reversão (<i>Switch-back</i>) de 7,5 mm e sobreposição de 2,5 mm e amplitude de 10 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	122
Figura 6.10	– Ilustração do formato de onda da corrente de soldagem para a técnica RMD (<i>Regulated Metal Deposition</i>) (MILLER, 2010)	123
Figura 6.11	– Oscilograma de corrente e tensão de soldagem do Experimento 105 (típico de todos os experimentos realizados com a técnica RMD)	124
Figura 6.12	– Aspecto do cordão do Experimento 105 com folga constante de 4,0 mm com curso de reversão (<i>Switch-back</i>) de 7,5 mm e sobreposição de 2,5 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	125
Figura 6.13	– Aspecto do cordão do Experimento 106 com desnivelamento (<i>high-low</i>) de 0 até 3,00 mm com curso de reversão (<i>Switch-back</i>) de 7,5 mm e sobreposição de 2,5 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	125
Figura 6.14	– Aspecto do cordão do Experimento 107 com folga variável de 3,0 até 4,5 mm com curso de reversão (<i>Switch-back</i>) de 7,5 mm e sobreposição de 2,5 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	126
Figura 6.15	– Situação desejada para soldagem com a técnica MIG/MAG RSSP	128
Figura A1.1	– Aspecto dos cordões dos Experimentos de 1 até 5 com MIG/MAG com técnica <i>Switch-back</i> (avanço e reversão de 10 mm), mas com arco aberto apenas nas laterais da junta e em polaridade CC+. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	137
Figura A1.2	– Aspecto dos cordões dos Experimentos 4 e 5 (repetições) é dos	137

experimentos 6 até 8 com MIG/MAG com técnica *Switch-back* (avanço e reversão de 10 mm), mas com arco aberto apenas nas laterais da junta e em polaridade CC+. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

- Figura A1.3 – Aspecto dos cordões dos Experimentos de 9 até 13 com MIG/MAG 138
com técnica *Switch-back* (avanço e reversão de 10 mm), mas com arco aberto apenas nas laterais da junta e em polaridade CC+. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)
- Figura A1.4 – Aspecto dos cordões dos Experimentos de 14 até 19 com MIG/MAG 138
com técnica *Switch-back* (avanço e reversão de 10 mm), mas com arco aberto apenas nas laterais da junta e em polaridade CC+. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)
- Figura A1.5 – Aspecto do cordão do Experimento 20 com MIG/MAG com técnica 139
Switch-back (avanço e reversão de 10 mm), mas com arco aberto apenas nas laterais da junta e em polaridade CC+. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)
- Figura A2.1 – Aspecto dos cordões dos Experimentos de 21 até 23 com MIG/MAG 140
com técnica *Switch-back* com arco aberto nas laterais da junta em polaridade CC+ e no meio da junta em polaridade CC-. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)
- Figura A2.2 – Aspecto dos cordões dos Experimentos de 24 até 26 com MIG/MAG e 140
técnica *Switch-back* com arco aberto nas laterais da junta em polaridade CC+ e no meio da junta em polaridade CC-. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)
- Figura A2.3 – Aspecto dos cordões dos Experimentos de 27 até 29 com MIG/MAG e 141
técnica *Switch-back* com arco aberto nas laterais da junta em polaridade CC+ e no meio da junta em polaridade CC-. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)
- Figura A2.4 – Aspecto do cordão do Experimento 30 com MIG/MAG e técnica 141
Switch-back com arco aberto nas laterais da junta em polaridade CC+ e no meio da junta em polaridade CC-. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)
- Figura A3.1 – Aspecto dos cordões dos Experimentos de 31 e 32 com MIG/MAG e 142
técnica *Switch-back* com arco aberto nas laterais da junta em polaridade CC+ e no meio da junta em polaridade CC-. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

- Figura A3.2 – Aspecto dos cordões dos Experimentos de 33 e 34 com MIG/MAG e 142
técnica *Switch-back* com arco aberto nas laterais da junta em
polaridade CC+ e no meio da junta em polaridade CC-. a) raiz do
cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)
- Figura A4.1 – Aspecto dos cordões dos Experimentos de 35 até 37 com MIG/MAG e 143
técnica *Switch-back* com arco aberto nas laterais da junta em
polaridade CC+ e no meio da junta em polaridade CC-. a) raiz do
cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)
- Figura A4.2 – Figura A4.2 – Aspecto dos cordões dos Experimentos de 38 até 40 143
com MIG/MAG e técnica *Switch-back* com arco aberto nas laterais da
junta em polaridade CC+ e no meio da junta em polaridade CC-. a)
raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)
- Figura A5.1 – Aspecto dos cordões dos Experimentos 55, 56 e 57 com VtCC+ de 144
3,6 mm/s (Veq de 0,93 mm/s), 4,0 mm/s (Veq de 1,01 mm/s), 5,2
mm/s (Veq de 1,21 mm/s), respectivamente: a) raiz do cordão; b) face
do cordão (soldagem da esquerda para direita)
- Figura A5.2 – Aspecto do cordão do Experimento 58 com VtCC+ de 8,0 mm/s e Veq 144
de 1,58 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da
esquerda para direita)
- Figura A5.3 – Aspecto do cordão do Experimento 59 com VtCC+ de 7,0 mm/s e Veq 145
de 1,46 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da
esquerda para direita)
- Figura A5.4 – Aspecto do cordão do Experimento 60 com VtCC+ de 7,5 mm/s e Veq 145
de 1,52 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da
esquerda para direita)
- Figura A5.5 – Aspecto do cordão do Experimento 61 com VtCC+ de 7,5 mm/s e Veq 146
de 1,55 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da
esquerda para direita)
- Figura A5.6 – Aspecto do cordão do Experimento 62 com VtCC+ de 10,0 mm/s e 146
Veq de 1,82 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da
esquerda para direita)
- Figura A5.7 – Aspecto do cordão do Experimento 63 com VtCC+ de 8,75 mm/s e 147
Veq de 1,69 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da
esquerda para direita)
- Figura A6.1 – Aspecto dos cordões dos experimentos 64 e 64r (réplica) com curso 148
de 5,0 mm, VtCC+ de 7,5 mm/s e VtCC- de 4,0 mm/s (Veq de 1,26

	mm/s), respectivamente: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	
Figura A6.2	– Aspecto dos cordões dos experimentos 65 e 65r (réplica) com curso de 7,5 mm, V_{tCC+} de 7,5 mm/s e V_{tCC-} de 4,0 mm/s (V_{eq} de 1,42 mm/s), respectivamente: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	148
Figura A6.3	– Aspecto do cordão do Experimento 60r (réplica) com curso de 10,0 mm, V_{tCC+} de 7,5 mm/s e V_{tCC-} de 4,0 mm/s (V_{eq} de 1,52 mm/s): a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	149
Figura A7.1	– Aspecto dos cordões dos experimentos 66 e 66r (réplica) com curso de 5 mm e V_{eq} de 1,52 mm/s (V_{tCC+} de 9,2 mm/s e V_{tCC-} de 4,9 mm/s), respectivamente: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	150
Figura A7.2	– Aspecto do cordão do Experimento 67 com curso de 7,5 mm e V_{eq} de 1,52 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (linha desenhada sobre contorno do cordão da região fundida para melhor caracterizar geometria) (soldagem da esquerda para direita)	150
Figura A7.3	– Aspecto do cordão do Experimento 67r (réplica) com curso de 7,5 mm e V_{eq} de 1,52 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	151
Figura A8.1	– Aspecto do cordão do Experimento 71 com curso de 7,5 mm e V_{eq} de 1,85 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	152
Figura A8.2	– Aspecto do cordão do Experimento 76 com curso de 7,5 mm e V_{eq} de 2,09 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da direita para esquerda)	152
Figura A8.3	– Aspecto do cordão do Experimento 75 com curso de 7,5 mm e V_{eq} de 2,20 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	153
Figura A8.4	– Aspecto do cordão do Experimento 73 com curso de 7,5 mm e V_{eq} de 2,31 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da direita para esquerda)	153
Figura A8.5	– Aspecto do cordão do Experimento 74 com curso de 7,5 mm e V_{eq} de 2,74 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)	154
Figura A8.6	– Aspecto do cordão do Experimento 78 com curso de 7,5 mm e V_{eq} de	154

2,36 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	– Características técnicas de fonte de soldagem DIGIPlus A7 (IMC, 2012)	42
Tabela 3.2	– Relação código binário em função do programa	42
Tabela 3.3	– Calibração da velocidade de alimentação de arame no alimentador STA-20	44
Tabela 3.4	– Verificação da velocidade da tocha no eixo Y	45
Tabela 3.5	– Verificação da velocidade da tocha no eixo X	46
Tabela 3.6	– Verificação da composição química das misturas gasosas	58
Tabela 3.7	– Composição química nominal do arame-eletrodo utilizada (AWS, 2005)	58
Tabela 4.1	– Parâmetros de regulagem para a soldagem MIG/MAG Pulsado na polaridade positiva (CC+), com DBCP de 22 mm, Ar+5%O ₂ e arame-eletrodo AWS ER70S-6 de 1,2 mm	60
Tabela 4.2	– Parâmetros de regulagem para a soldagem MIG/MAG corrente contínua na polaridade negativa (CC-), com DBCP de 22 mm, Ar+5%O ₂ e arame-eletrodo AWS ER70S-6 de 1,2 mm	62
Tabela 4.3	– Verificação da velocidade equivalente (valor calculado X valor real) para a técnica <i>Switch-back</i>	66
Tabela 4.4	– Parâmetros de soldagem para cada amplitude de movimento transversal avaliado	69
Tabela 4.5	– Sequência de testes de soldagem para determinação do volume máximo depositado no centro da junta	71
Tabela 4.6	– Sequência de testes de soldagem para determinação do volume máximo depositado no centro da junta	73
Tabela 4.7	– Sequência de testes de soldagem para determinação do volume máximo depositado no centro da junta	73
Tabela 4.8	– Sequência dos testes de soldagem para determinação da amplitude de movimento transversal da tocha para folga de 4 mm	76
Tabela 4.9	– Sequência dos testes de soldagem para estudo a influência da velocidade lateral para a folga de 4 mm	81
Tabela 4.10	– Parâmetros de regulagem para a soldagem MIG/MAG Pulsado na polaridade positiva (CC+) com DBCP de 22 mm, Ar+8%CO ₂ (Ar+10%CO ₂) e arame-eletrodo AWS ER70S-6 de 1,2 mm	85
Tabela 4.11	– Parâmetros de soldagem para experimentos variando a amplitude de movimento transversal e a velocidade de soldagem em polaridade	86

	positiva (CC+)	
Tabela 4.12	– Parâmetros de soldagem dos experimentos com diferentes correntes médias e gases de proteção em CC+ (folga da raiz de 4 mm e amplitude de 9 mm)	89
Tabela 4.13	– Sequência dos testes de soldagem para estudo da influência do curso do <i>Switch-back</i> nas placas de testes com folga de 4 mm	92
Tabela 4.14	– Parâmetros de soldagem para experimentos variando o curso do <i>Switch-back</i> com a velocidade equivalente constante	93
Tabela 4.15	– Sequência dos testes de soldagem para estudo da influência da velocidade equivalente de soldagem do <i>Switch-back</i>	94
Tabela 4.16	– Experimentos de soldagem para verificação da influência da Fator Energético ponderado do <i>Switch-back</i>	96
Tabela 5.1	– Parâmetros de soldagem para experimentos com CCC- realizados sobre chapa sem utilizar a técnica MIG/MAG RSSP	99
Tabela 5.2	– Parâmetros de soldagem para o Experimento 5.3 com Pulsado em CC+ e CCC- realizados sobre chapa sem utilizar a técnica MIG/MAG RSSP	100
Tabela 5.3	– Parâmetros de soldagem para teste com sobreposição na trajetória da técnica MIG/MAG RSSP	103
Tabela 5.4	– Parâmetros de soldagem para experimentos variando a amplitude transversal da tocha (velocidade equivalente de soldagem foi constante) para $I_{m+} = 130$ A, $I_{m-} = 0$ A e folga de 4 mm	105
Tabela 5.5	– Resultados obtidos dos experimentos variando a amplitude transversal da tocha (a velocidade equivalente de soldagem foi constante = 10,5 mm/s) para $I_{m+} = 130$ A, $I_{m-} = 0$ A e folga de 4 mm	105
Tabela 5.6	– Parâmetros de soldagem para experimentos variando a velocidade da tocha (a amplitude transversal da tocha foi constante) para $I_{m+} = 130$ A, $I_{m-} = 0$ A e folga de 4 mm	106
Tabela 5.7	– Resultados obtidos dos experimentos variando a velocidade da tocha (a amplitude de movimento da tocha é constante = 9 mm) para $I_{m+} = 130$ A, $I_{m-} = 0$ A e a folga de 4 mm	107
Tabela 5.8	– Parâmetros de soldagem para experimentos com sobreposição de 2; 2,5 e 3,5 mm na trajetória da técnica MIG/MAG RSSP	108
Tabela 5.9	– Parâmetros de soldagem para teste com desvio lateral do movimento e movimento central de tecimento na técnica MIG/MAG RSSP	113
Tabela 6.1	– Valores de desnivelamento utilizados na avaliação de juntas	117

desniveladas

Tabela 6.2	– Seções transversais das soldas resultantes dos experimentos de desnivelamento (<i>high-low</i>) para $I_{m+} = 130$ A e $I_{m-} = -127$ A e folga de 4 mm	119
Tabela 6.3	– Seções transversais dos resultados obtidos do Experimento 101 de desalinhamento (folga variável) para $I_{m+} = 130$ A e $I_{m-} = -127$ A	121
Tabela 6.4	– Parâmetros de soldagem da técnica RMD (<i>Regulated Metal Deposition</i>)	124
Tabela 6.5	– Seções transversais do Experimento 107 com desalinhamento (folga variável) para $I_{m+} = 124$ A	126

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xxviii
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: MÉTODOS DE CONTROLE DA FORMAÇÃO DA POÇA EM PASSES DE RAIZ EM SOLDAGEM A ARCO	04
2.1 – Controle da poça de fusão através de cobrejunta	05
2.2 – Controle da poça de fusão pela estabilização da transferência metálica	11
2.3 – Controle da poça de fusão através da oscilação da tocha	17
2.4 – Controle da poça de fusão através da colocação de cordões de ancoramento	21
2.5 – Controle da poça de fusão através de resfriamento da mesma	23
2.6 – Controle da poça de fusão pela variação dos parâmetros elétricos ao longo de junta e outros equipamentos especiais	26
2.7 – Outros métodos aplicados em soldagem de tubulações/dutos	35
2.8 – Considerações Finais	36
CAPÍTULO III – METODOLOGIA, EQUIPAMENTOS E INSUMOS	38
3.1 – Metodologia fundamental	38
3.2 – Bancada experimental	40
3.2.1 – Fonte de soldagem e alimentador do arame-eletrodo	41
3.2.2 – Mesa de coordenadas	44
3.2.3 – Fixação das placas de teste	46
3.2.4 – Sistema de aquisição de sinais elétricos (dados)	47

3.2.5 – <i>Comando da fonte através de sensoriamento para sincronização entre movimento (posição) da tocha e modo de soldagem</i>	48
3.2.6 – <i>Detector de transferência metálica “P-GMAW Precise Tuner”</i>	52
3.3 – Trajetória de soldagem <i>Switch-back</i> do tipo lateral-lateral-centro	54
3.4 – Sincronização da corrente com a posição da tocha	56
3.5 – Insumos	57
3.5.1 – <i>Gás de proteção</i>	57
3.5.2 – <i>Metais de base e de adição</i>	58

CAPÍTULO IV – PARAMETRIZAÇÃO DA SOLDAGEM MIG/MAG E DA TÉCNICA

<i>SWITCH-BACK</i>	59
4.1 – Definição dos parâmetros de corrente pulsada na polaridade positiva (CC+)	59
4.2 – Definição dos parâmetros de corrente contínua na polaridade negativa (CC-)	61
4.3 – Avaliação da combinação de polaridades durante soldagem	63
4.4 – Determinação da velocidade de soldagem (da tocha e equivalente) na técnica <i>Switch-back</i>	64
4.5 – Determinação do volume máximo depositado nas laterais e no meio da junta para abertura de raiz de 6 mm	66
4.5.1 – <i>Materiais e métodos</i>	67
4.5.2 – <i>Determinação do volume máximo depositado nas laterais da junta com abertura de raiz de 6 mm</i>	68
4.5.3 – <i>Determinação do volume máximo depositado no centro da junta com abertura de raiz de 6 mm</i>	71
4.6 – Determinação da influência da amplitude de movimento transversal da tocha e velocidade de soldagem sobre a formação do cordão de solda para uma abertura de raiz (folga) de 4 mm	75
4.7 – Otimização paramétrica para controle da falta de fusão na raiz do cordão com abertura de raiz (folga) de 4 mm	84
4.7.1 – <i>Influência do aumento da corrente média nas laterais da junta (CC+) e troca do gás de proteção</i>	84
4.7.2 – <i>Influência do curso da trajetória do Switch-back sobre a formação do cordão de solda para uma abertura de raiz (folga) de 4 mm</i>	91

4.7.3 – <i>Influência do aumento da velocidade equivalente mantendo a porcentagem dos tempos em cada polaridade constante no ciclo de solda</i>	94
4.7.4 – <i>Influência do aumento da velocidade equivalente mantendo a Fator Energético ponderado constante no ciclo de solda</i>	95
4.8 – Considerações Finais	96
 CAPÍTULO V – APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE SOLDAGEM MIG/MAG COM REVERSÃO SINCRONIZADA DO SENTIDO DA TOCHA E DA POLARIDADE (MIG/MAG RSSP) COM PULSADO EM CC+ NAS LATERAIS E CURTO-CIRCUITO CONTROLADO EM CC- NO CENTRO DA JUNTA	97
5.1 – Parametrização da técnica Curto-Circuito Controlado em polaridade negativa	97
5.2 – Sobreposição da trajetória do MIG/MAG RSSP	101
5.3 – Otimização da amplitude transversal do movimento e da velocidade da tocha nas laterais da junta (V_{tCC+}) com sobreposição de 2 mm na trajetória do modo RSSP	104
5.4 – Otimização do valor da sobreposição na trajetória da técnica MIG/MAG RSSP	108
5.5 – Efeito do tecimento no passe central da técnica MIG/MAG RSSP	112
5.6 – Considerações Finais	115
 CAPÍTULO VI – AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE SOLDAGEM MIG/MAG COM REVERSÃO SINCRONIZADA DO SENTIDO DA TOCHA E DA POLARIDADE (MIG/MAG RSSP) EM JUNTAS DESNIVELADAS E DESALINHADAS	116
6.1 – Aplicação da técnica MIG/MAG RSSP em juntas desniveladas (<i>high-low</i>)	117
6.2 – Aplicação da técnica MIG/MAG RSSP em juntas desalinhadas (folga variável)	120
6.3 – Comparação da técnica de soldagem MIG/MAG com reversão sincronizada de sentido da tocha e polaridade de soldagem (MIG/MAG RSSP) com outro processo de soldagem para passe de raiz	123
6.4 – Considerações Finais	127

CAPÍTULO VII – CONCLUSÕES	129
CAPÍTULO VIII – RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	131
CAPÍTULO IX – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133
Apêndice I – Determinação do volume máximo depositado nas laterais da junta com abertura de raiz de 6 mm	138
Apêndice II – Determinação do volume máximo depositado no centro da junta com abertura de raiz de 6 mm e amplitude de 10 mm	141
Apêndice III – Determinação do volume máximo depositado no centro da junta com abertura de raiz de 6 mm e amplitude de 11 mm	143
Apêndice IV – Determinação do volume máximo depositado no centro da junta com abertura de raiz de 6 mm e amplitude de 12 mm	144
Apêndice V – Influência do aumento da corrente média nas laterais da junta (CC+) e troca do gás de proteção	145
Apêndice VI – Influência do curso da trajetória do <i>Switch-back</i> sobre a formação do cordão de solda para uma abertura de raiz (folga) de 4 mm	149
Apêndice VII – Influência do curso do <i>Switch-back</i> sobre o acabamento do cordão de solda para uma mesma velocidade equivalente	151
Apêndice VIII – Influência do aumento da velocidade equivalente mantendo a porcentagem dos tempos em cada polaridade constante no ciclo de solda	153

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A indústria do petróleo e gás depende significativamente da construção de linhas dutoviárias para transporte de longa distância e das tubulações dentro das plantas industriais, já que é a forma de transporte mais barata e rápida de seus produtos. Como estas tubulações/dutos¹ são construídas unindo-se tubos de aço em série, muitas das dificuldades de fabricação estão direta ou indiretamente ligadas aos processos de soldagem utilizados. Talvez o principal problema na soldagem de tubulações/dutos seja a execução do chamado passe de raiz. A dificuldade de realização do passe de raiz é devida aos desalinhamentos (variação da abertura da junta) e desnivelamentos (entre as faces dos tubos², devido à falta de concentricidade dos mesmos, conhecidos em inglês como *high-low*) e se torna ainda maior nos casos onde não se utiliza cobrejunta. Manualmente um soldador especializado é capaz de controlar/manipular a poça de fusão a partir de informações visuais e executar o passe de raiz, apesar das dificuldades apontadas acima. Entretanto, na soldagem manual a produtividade fica limitada, aumentando o custo e o tempo de produção, podendo-se dizer que a soldagem manual dos passes de raiz é o gargalo da fabricação de tubulações/dutos. A solução, então, seria automatizar a soldagem do passe de raiz. A literatura corrente apresenta alguns processos e/ou técnicas com potencial para executar passes de raiz de forma automatizada. Por exemplo, pelo controle da trajetória da tocha na soldagem MIG/MAG e modulação da corrente de soldagem (MIG/MAG com curto-circuito controlado, como as versões comerciais STT ou RMD).

¹ - Apesar de um uso não padrão da terminologia, neste trabalho se faz referência a dutos como designação genérica de instalação constituída por tubos ligados entre si, incluindo os componentes e complementos, destinada ao transporte ou transferência de fluidos, entre as fronteiras de unidades operacionais geograficamente distintas e tubulações como conduto fechado que se diferencia de duto pelo fato de movimentar ou transferir fluido sob pressão dentro dos limites de uma planta industrial ou instalação de produção ou armazenamento de petróleo e seus derivados.

² - Apesar da norma N-1738 do Petrobras, e provavelmente uma norma afim que está sendo discutida no âmbito da ABNT (PN 58:000.13-001/1 — Ensaaios não destrutivos — Terminologia — Parte 1: Descontinuidades em juntas soldadas), definir apenas desalinhamento e, de forma divergente da definição adotada neste trabalho, pois essa norma define desalinhamento com o que foi definido neste texto como desnivelamento, por achar mais correcente a terminologia proposta, em que alinhamento está ligada à linha e nívelamento à nível, adotou-se neste trabalho uma terminologia própria.

No caso do controle da trajetória da tocha, alguns trabalhos investigaram o potencial da técnica *Switch-Back* no controle da raiz na soldagem MIG/MAG. Esta técnica consiste basicamente em movimentar a tocha para frente e para trás ao longo da direção de soldagem, algo como um tecimento longitudinal. Kaneko et al. (2007) avaliaram a técnica *Switch-Back* com corrente pulsada em juntas de topo sem a utilização de cobrejunta em chapas de aço de 3,2 mm de espessura e verificaram que a técnica permitiu um maior controle da raiz da solda em relação à soldagem MIG/MAG convencional. Este controle foi favorecido quando se utilizou maior nível de velocidade de soldagem durante o avanço da tocha em relação ao recuo da mesma. Yamane et al. (2007) utilizaram com sucesso a combinação da técnica *Switch-Back* com o tradicional tecimento transversal para soldagem de juntas de topo com chanfro em V (45°), em chapas com 12 mm de espessura, abertura de raiz de 4,0 mm e sem cobrejunta na soldagem MIG/MAG Pulsada. De acordo com estes pesquisadores, o uso de alta velocidade de soldagem durante o avanço e o recuo de forma sincronizada com a corrente pulsada permite depositar metal fundido nas bordas das juntas sem ocorrer escorrimento e perfuração na raiz. Já o uso de baixas velocidades de soldagem no avanço seguinte permite refundir o material depositado anteriormente nas bordas da junta, unindo-os. Deve ser ressaltado que, no trabalho em questão, quando a tocha se aproxima das bordas da raiz da junta, a corrente pulsada atinge o seu valor de pico transferindo a gota metálica, e quando se aproxima do centro da junta, a corrente atinge o seu valor de base, não ocorrendo transferência de metal, controlando assim a raiz da solda. Desta maneira, foi possível a confecção de soldas com boa aparência e, principalmente, sem a perfuração da raiz da junta. Pode-se perceber que por esta técnica há um sincronismo entre a pulsação e o tecimento, o que faz com que o tempo de parada lateral no tecimento seja curto (2 a 5 ms), assim como a própria transição entre as laterais (de 6 a 15 ms), o que demanda tecimento com alta frequência (acima de 500 Hz), difícil em termos de equipamentos e em discordância com o normalmente aplicado (de 1 a 2 Hz).

De acordo com Scotti e Ponomarev (2008), com MIG/MAG Pulsado pode se obter uma transferência estável e regular, que proporciona pouco respingo e bom acabamento do cordão. Apesar de não ter sido encontrado na bibliografia corrente, outros modos operacionais do processo MIG/MAG poderia também ser usados em *Switch-back*. Por exemplo, a soldagem MIG/MAG com eletrodo na polaridade negativa (CC-), a qual têm como características principais uma maior taxa de fusão do arame eletrodo e uma menor penetração (poça de fusão mais “fria”), que leva a uma menor quantidade de calor transferido à peça em comparação com à soldagem com CC+. Em seu trabalho, Talkington (1998) concluiu que no balanço energético para soldagem na CC- aproximadamente 30% da energia é transferida ao metal de base e 70% para o arame-eletrodo. E no caso da

soldagem na CC+ ocorre o contrário. Por isso, menores penetrações são obtidas em CC- comparadas a CC+.

No caso de polaridade variável, ou seja, MIG/MAG CA, a soldagem na polaridade negativa pode controlar o aquecimento da poça de fusão e a penetração, dependendo do tempo em cada polaridade por período. Nascimento et al. (2008) realizaram um trabalho com diferentes formas de ondas de corrente para soldagem MIG/MAG CA e diferentes tempos nas polaridades direta (CC-) e inversa (CC+) por período. Segundo este trabalho, quanto maior a porcentagem do tempo na polaridade negativa em um período, menor a penetração, mas pior é a estabilidade do arco, ocorrendo mais respingos.

Tomando como base a ideia de Yamane et al (2007), mas procurando-se superar as limitações apontadas quanto ao tecimento entre as laterais da junta, este trabalho tem como objetivo geral tentar possibilitar passes de raiz de forma automatizada a partir de uma melhor distribuição do calor na junta pela combinação dos controles da trajetória da tocha com o da modulação da corrente de soldagem de forma otimizada. Mais especificamente, a técnica *Switch-Back* será combinada de forma sincronizada com o processo MIG/MAG com polaridade variável, utilizando o modo de corrente pulsada com o eletrodo na polaridade positiva (CC+) nas laterais da junta e o modo de corrente contínua com o eletrodo na polaridade negativa (CC-) no centro. A ideia é verificar se esta combinação pode promover efetivamente o controle da poça de fusão, atuando sobre a robustez do cordão quanto à penetração e estabilidade da poça fundida.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: MÉTODOS DE CONTROLE DA FORMAÇÃO DA POÇA EM PASSES DE RAIZ EM SOLDAGEM A ARCO

A revisão bibliográfica apresentada neste trabalho foi feita na forma de busca de patentes, visando encontrar propostas potenciais de métodos, técnicas ou processos para soldagem automatizada de passes de raiz em tubulações/dutos. As palavras-chave usadas em buscas foram: *“welding pool control MIG MAG GMAW”*; *“welding root pass MIG MAG GMAW”*; *“welding bead formation MIG MAG GMAW”*; *“welding heat control MIG MAG GMAW”*; *“welding weaving root pass MIG MAG GMAW”*; *“pipeline root pass welding MIG MAG GMAW”*; *“no backing root pass MIG MAG GMAW”*; *“automated root pass welding MIG MAG GMAW”*; *“negative polarity short circuit welding MIG MAG GMAW”* e *“switch-back MIG MAG GMAW”*. A busca foi realizada na Internet, nas maiores bases de patentes da União Europeia, Japão, China, Coreia, Estados Unidos e Brasil (neste caso com as mesmas palavras-chave traduzidas para o português). As bases de patente pesquisadas foram:

- EPO – Escritório Europeu de Patentes (<http://www.epo.org>);
- USPTO – Escritório Norte-americano de Marcas e Patentes
<http://www.uspto.gov>);
- INPI – Instituto Nacional da Propriedade Intelectual (<http://www.inpi.gov.br>);
- Google Patents (<http://www.google.com.br/patents>);
- FPO (<http://www.freepatentsonline.com>).

O objetivo desta busca de patentes foi verificar se a técnica de soldagem MIG/MAG RSSP (com Reversão Sincronizada do Sentido da Tocha e da Polaridade), aqui desenvolvida, difere ou assemelha de outras existentes para a mesma aplicação, podendo assim ser patenteada. Para criar uma lógica para exposição das patentes encontradas nesta busca, a ordem de apresentação será por classes em que as patentes foram agrupadas pelos meios de solucionar o problema (fazer passe de raiz de forma automatizada), seja, por exemplo, por uso de cobrejunta (o que difere da presente proposta) ou por distribuição de calor de forma localizada (o que assemelha com a presente proposta). É importante destacar que essa busca foi feita em grupo, já que outro membro da equipe (Oksana

Kovalenko) propõe uma outra técnica similar, MIG/MAG APSTT (com Alternância de Polaridade Sincronizada com Tecimento Transversal). Desta forma, a redação deste capítulo em ambas dissertações é bem similar.

2.1 – Controle da poça de fusão através de cobrejunta

Cobrejuntas têm sido usados há tempos para facilitar a confecção de passes de raiz, por se caracterizar como um suporte sob o chanfro para o metal líquido (poça de fusão), até sua solidificação. Desta forma, não se precisa preocupar tanto com os parâmetros de soldagem para evitar a perfuração. Mas existem dificuldades operacionais para o emprego de cobrejuntas, dificuldades estas que se tornam maiores em soldagem de tubulações/dutos. Por isto, se faz ao longo dos tempos tentativas de se inventar métodos de se usar cobrejuntas nas soldagens de tubulações/dutos de formas mais práticas.

A partir de 1950, quando no mundo rapidamente começou crescer a área de produção de petróleo e gás, aumentou substancialmente a quantidade de invenções correspondentes à soldagem de tubulações/dutos. Como visto no Capítulo I, o maior problema na fabricação das tubulações/dutos em campo é a obtenção do alinhamento e nivelamento entre tubos. Por isto, o principal objetivo das invenções desde então foi garantir essas condições, pela utilização de mecanismos especiais, agindo por fora ou por dentro dos tubos, possibilitando a soldagem de forma interna ou externa. As seguintes patentes têm uma certa relação com esse objetivo.

Uma das vertentes foi pela procura de equipamentos que pudessem fazer o alinhamento e nivelamento entre tubos através de um equipamento que se movimenta internamente ao tubo (denominados acopladeiras internas ou popularmente como “pigs”) e, através de grampos (“clamps”) expansíveis, alinhar e nivelar as duas pontas dos tubos para realizar a soldagem, como ilustra a Figura 2.1. Nesta direção, pode-se citar em ordem cronológica as patentes de Adams e Mayer (1952), *US 2615414 (A)*, os quais inventaram um equipamento denominado “*Internal pipe aligning clamp*”, a de Lamar (1969), registrada como, “*Vacuum supply for internal pipeline line-up clamp seal space*” (*US 3458106 (A)*), a Clark (1969), denominada “*Apparatus for aligning pipe ends*” (*US 3425614 (A)*), a de Edmund e Reginald (1972), chamada de “*Internal line-up clamp for pipe lines*” (*US 3699635 (A)*), a de Scully e Wilson (1979), “*Size-adjustable internal pipe clamp apparatus*” (*US 4140262 (A)*), a de LaForce (1983) “*Clamping method and apparatus for solid phase welding*” (*US 4418860 (A)*) e a de Jones (1992), “*Resilient lineup clamp*” (*US 5090608 (A)*).

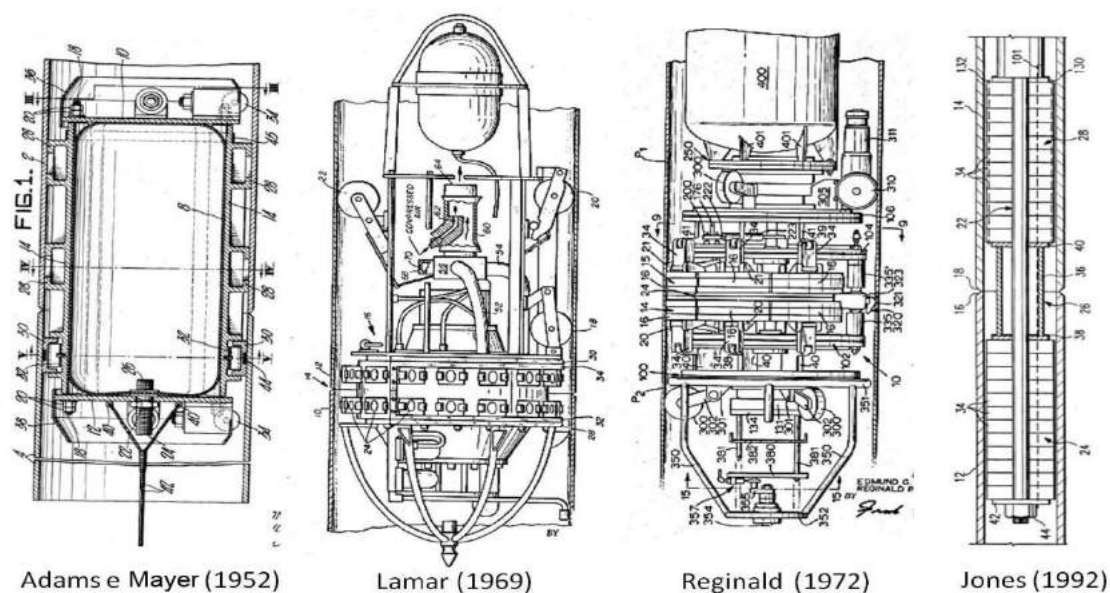


Figura 2.1 – Exemplos de acopladeiras internas (“pigs”) (adaptado de ADAMS; MAYER, 1952; LAMAR, 1969; REGINALD, 1972; JONES, 1952)

Uma outra forma pesquisada e desenvolvida foi a de fixar os tubos por fora, chamados de acopladeiras externas, como ilustra a Figura 2.2. Trata-se de grampos de fixação na forma de cintas externas para garantir a fixação das pontas dos tubos. Como exemplo destes dispositivos, pode-se citar: Rogers (1968), patente *US 3400872 (A)*, “*Lineup clamp*”; Barry (1969), patente *US 3422519 (A)*, “*Lineup clamp for pipe*”; Leon (1970), patente *US 3512229 (A)*, “*Outside pipe lineup clamp*”; e Clarc (1975), patente *US 3920232 (A)*, “*Apparatus for aligning pipe ends*”.

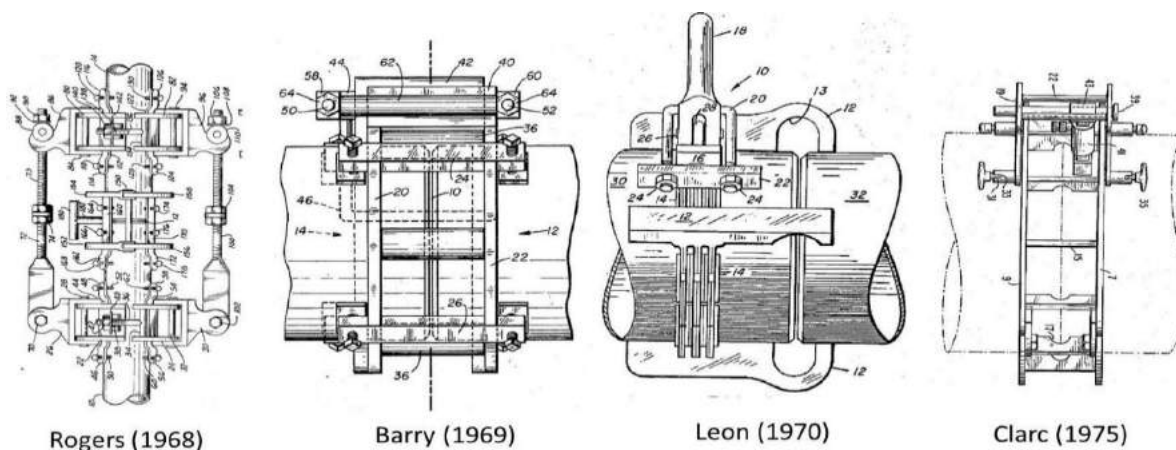


Figura 2.2 – Exemplos de acopladeiras externas (adaptado de ROGERS, 1968; BARRY, 1969; LEON, 1970; CLARC, 1975)

Estas duas formas de acoplamento de tubos facilitam muito a execução do passe de raiz, mas não são condições suficientes para garantir a sanidade do passe de raiz em soldagens automatizadas. Por isto, têm sido desenvolvidos equipamentos que, além de acopladoras, agem também como cobrejunta (Figura 2.3). John e Ervan (1965) patentearam o equipamento “*Internal expanding line-up pipe clamp*” (US 3197195 (A)). Robert e John (1972), inventaram o “*Internal pipe lineup clamp*”, usando cobrejunta de fluxo (patente US 3633813 (A)). Já Ballis et al. (1973) patentearam (US 3741457 (A)) o “*Lineup clamp and backup device*”, enquanto Kaneyama, Murakami e Nakamura (1976) desenvolveram o “*Clamping mechanism for line-up of pipes*” (US 3979041 (A)). Ainda nesta direção, Cunningham e White (1976) fizeram a patente US 3937382 (A), “*Internal pipe clamp with weld backup*”. Chang e Renshaw (1980) patentearam o “*Automatic pipe welding apparatus and method*” (US 4216896 (A)). Rinaldi (1992) patenteou sua invenção denominada “*Weld suporting ring for pipes*” (US 5110031 (A)), enquanto Leduc (1994), pela CRC-Evans Pipeline International, patenteou o dispositivo “*Internal line up clamp*” (US 5356067 (A)).

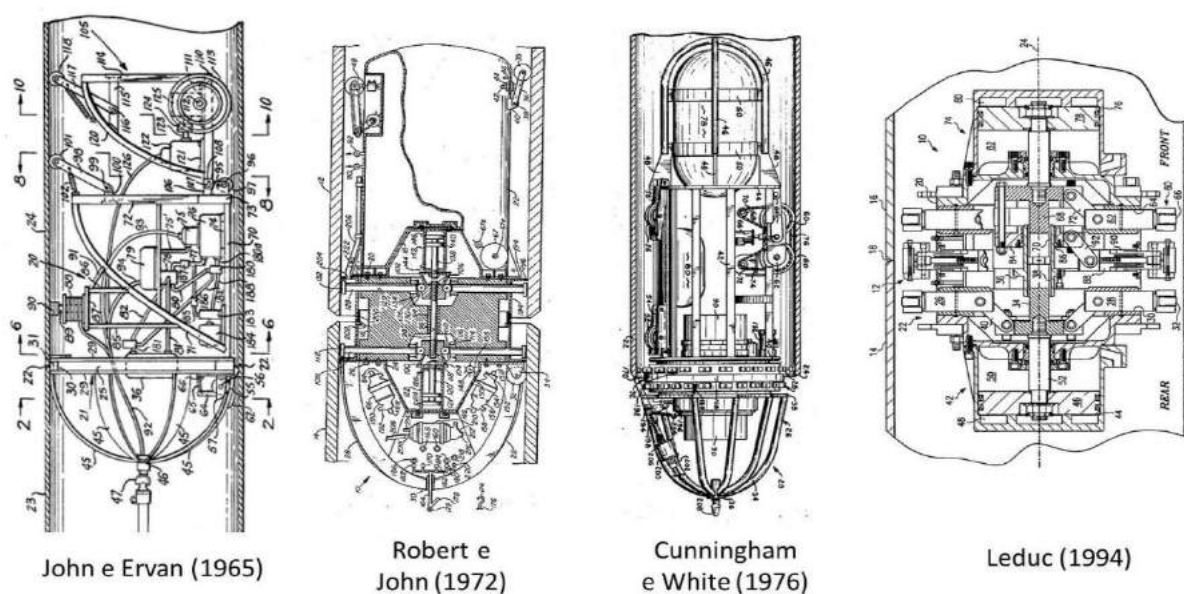


Figura 2.3 – Os exemplos de acopladeiras internas ou popularmente conhecidas como “pigs” com cobrejuntas (adaptado de JOHN; ERVAN, 1965; ROBERT; JOHN, 1972; CUNNINGHAM; WHITE, 1976; LEDUC, 1994)

Na procura por formas de se usar cobrejuntas em soldagens de tubos, uma das mais novas invenções é a de Dierlam (pela CRC-Evans Pipeline International), que em 1997 depositou a patente “*A Plug style pipe line-up clamp with copper back-up shoes*” (US 5597108 (A)), onde reivindica ter desenvolvido a primeira máquina interna para centralizar tubos de diâmetro “pequeno” e realizar a soldagem passe de raiz com uso de cobrejunta. O

mecanismo de fixação do cobrejunta à superfície interna do tubo funciona através de cilindros hidráulicos, como ilustra a Figuras 2.4.

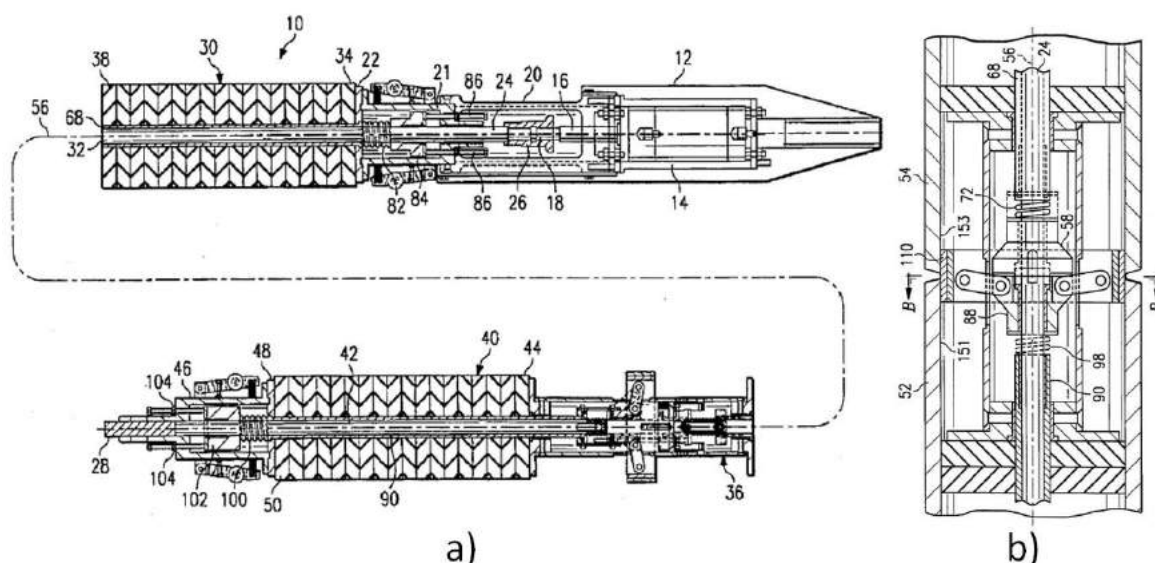


Figura 2.4 – a) vista geral da máquina interna para soldagem de tubulações/dutos de acordo com a patente *US 5597108 (A)*; b) vista ilustrativa da parte central da máquina, onde (110) representa o cobrejunta expansível por um mecanismo hidráulico (DIERLAM, 1997)

Hirsch e Pillard (1996) propuseram através da patente intitulada *Pipe clamping device (US 5583305 (A))* utilizar um equipamento complexo para executar o controle de qualidade dos passes de raiz, como ilustra a Figura 2.5. O equipamento não tem como objetivo oferecer um cobrejunta para a soldagem passe de raiz, mas oferece uma vazão de gás de proteção, que pode ser usado como proteção de raiz de lado inteiro. O equipamento pode ser completado pelo uma tocha de soldagem e executar a soldagem do passe de raiz de lado interno. Mas a inovação tem como particularidade a modificação para melhoria de máquinas similares já existentes (acopladeiras internas), a saber, presença de uma câmera de filmagem ou um outro objeto de ensaio não destrutivo, que na hora da soldagem ou depois da soldagem possa apresentar dados do estado de qualidade de passe de raiz. O motivo desse inovação foi garantir a qualidade de passe de raiz antes de realizar a soldagem dos passes de enchimento e de acabamento. No caso de presença de um defeito, a máquina permite realizar reparo, a saber, a máquina é equipada com um disco rotacional que tem um suporte, no qual pode ser fixada uma ferramenta, como escova, disco para lixar, eletrodo, etc.

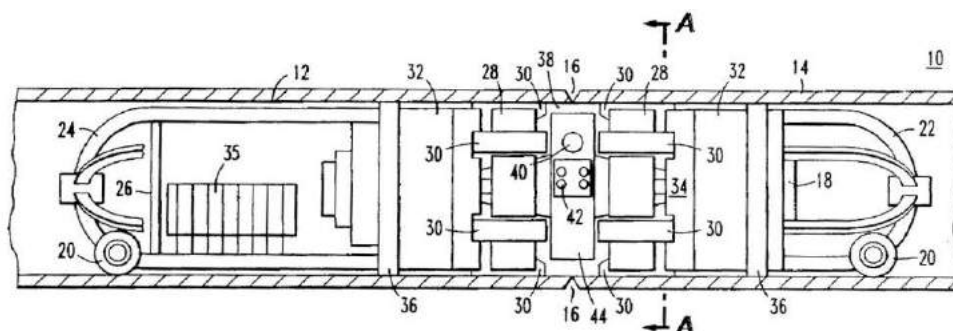


Figura 2.5 – Ilustração de equipamento da patente *US 5583305 (A)*, onde (12) e (14) são os tubos a serem unidos de topo, (16) é o chanfro para união, (28) é o mecanismo para fixação o equipamento dentro de tubos, (44) é uma base rotacional, (40) é a câmara de filmagem ou de um objeto de ensaio não destrutivo e (42) são as lâmpadas para iluminar o passe de raiz de lado inteiro (HIRSCH; PILLARD, 1996)

Uma outra abordagem para o uso de cobrejuntas e soldagens de tubulações/duros foi encontrada no resumo (Abstract) da patente dos cientistas Michiharu, Yuji e Tadashi (1991), denominada *One-side welding procedure*, cuja referência *JPH 03180275 (A)* indica ser originalmente na língua japonesa. Eles tentaram mostrar como o cobrejunta faz melhorar a qualidade do cordão da raiz em soldagem de um único lado (de lado interno) em juntas de topo chanfradas. A Figura 2.6 ilustra a configuração do cobrejunta (a) por eles proposto, cujas dimensões principais são a espessura (t) que deve ser ≥ 6 mm e largura (L) de 30 a 100 mm, o qual tem um chanfro pré-usinado (1), com profundidade (D) de 0,4 mm a 1,2 mm, largura (W) de 10 a 30 mm, para dar acabamento ao reforço da raiz, e é fixado em um dos metais de base (no caso da presente figura, no da direita) por soldagem. Por este método, a soldagem completa pode ser realizada sem necessidade de boa precisão na preparação do chanfro. Figura 2.6(b) indica que o cobrejunta está de lado externo e (c) mostra que cobrejunta está soldado por um lado do tubo e o outro está posicionado por um fixador.

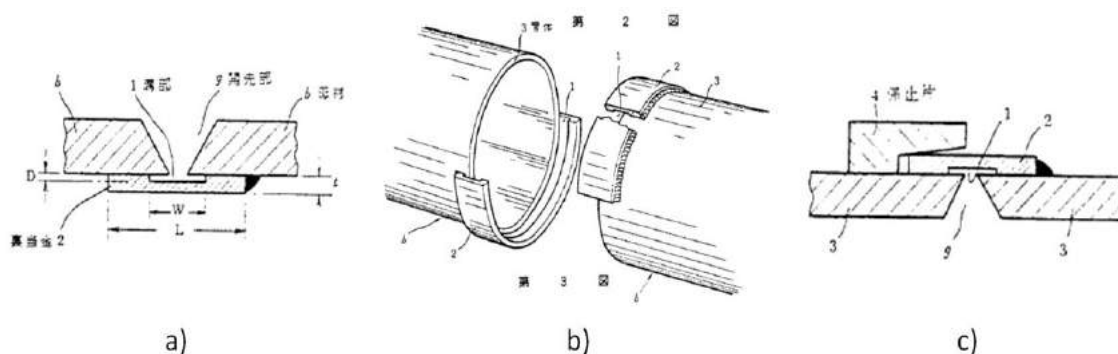


Figura 2.6 – Ilustração de montagem dos elementos principais do método de soldagem da patente *JPH 03180275 (A)* (YUJI; TADASHI, 1991)

Já os cientistas Takeshi e Teruhiko (1991), patentearam um método (*Circumferential welding method for double pipes – JPH 03207575 (A)*), para melhorar a eficiência da instalação, redução do custo e garantia de manutenção de uma elevada resistência mecânica e elevada resistência à corrosão na soldagem de duplo tubos (um dentro de outro) através de preparação de junta especial. Apesar da semelhança com o uso de cobrejuntas, este método, como se verá pela descrição, difere dessa abordagem, sendo apresentado aqui apenas pela semelhança. A Figura 2.7 ilustra configuração de junta. O duplo tubo 1 (à esquerda) é constituído por um tubo externo 2 e um tubo interno 3 enlucado internamente, de matérias dissimilares. De forma análoga, o tubo 1' (à direita) é composto por um tubo externo 2' e um tubo interno 3', também de materiais dissimilares. Antes da união, os tubos 3 e 3' são removidos e usinados para formar a folga 4 e 4', respectivamente. Também são feitos chanfros nos tubos 2, 2', 3 e 3', para serem soldados de topo. A descrição da patente não deixa claro, mas a soldagem entre os tubos externos 1 e 1' é feita pelo lado de fora, enquanto os tubos internos são soldados pelo lado de dentro. A criação está no fato de não haver diluição do cordão de solda entre tubos 2 e 2' (6) com o material dos tubos 3 e 3' e nem entre o cordão de solda entre tubos 3 e 3' (5) com o material dos tubos 2 e 2', devido ao espaçamento (4 e 4') entre os tubos, garantindo as propriedades desejadas. Presente invenção pode ser utilizado nos processos GMAW, GTAW e SMAW.

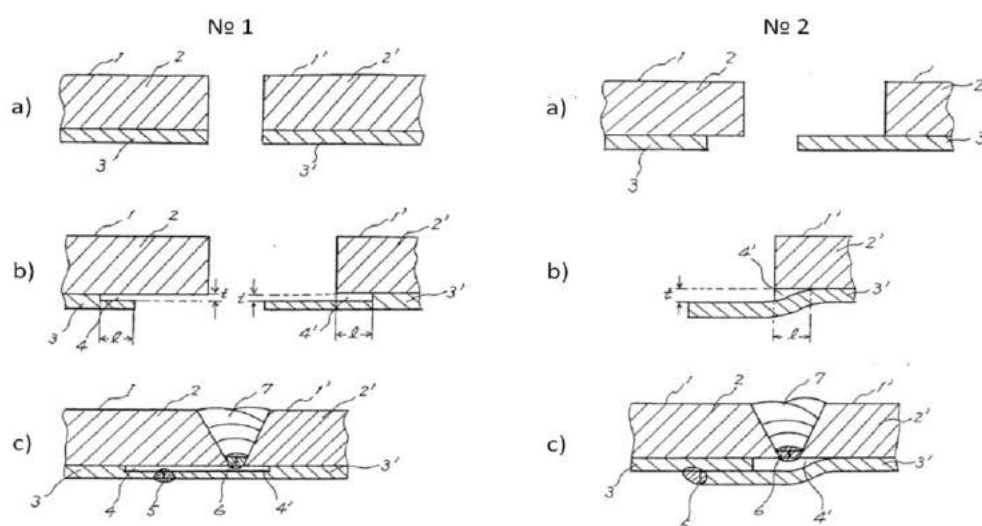


Figura 2.7 – Ilustração da configuração da junta na soldagem duplo tubos da patente *JPH 03207575 (A)*, onde (1) e (1') são os tubos externos, (3) e (3') são os tubos internos, (4) e (4') são espaçamentos entre as paredes dos tubos na região da solda, (5) é o cordão de solda que liga os tubos interno, (6) é o passe de raiz da união entre os tubos externo, (7) são os cordões de enchimento e acabamento e (t) é a folga entre tubo externo e inteiro (TAKESHI; TERUHIKO, 1991)

Resumindo, os ganhos com as técnicas (métodos) de controle da poça de fusão através de cobrejunta em soldagem de tubulações/dutos, usadas pelos pesquisadores Michiharu, Yuji e Tadashi (1991) e Hirsch e Pillard (1996), entre outros, são reais, mas diferem da presente proposta, em que um dos apelos é não necessitar do uso de cobrejunta. Como se sabe, usar cobrejunta tem uma complicação operacional, apesar de facilitar a montagem.

2.2 – Controle da poça de fusão pela estabilização da transferência metálica

Doyle et al. (2009) propuseram uma patente para melhorar as características de passes de raiz em soldagens MIG/MAG de tubos (*Method to improve the characteristics of a root pass pipe weld – US 2009/0321402 (A1)*). Trata-se de uma continuação (aperfeiçoamento) de outras patentes com mesmo objetivo (Nº US 8373093 (B2), 27 de Junho de 2008), conhecidas na literatura e na indústria pela sigla STT (*Surface Tension Transfer*), agora mesclando a fase STT com um período de pulsação. Resumidamente, esta patente descreve um método e um sistema para a formação de passes de raiz para tubos. Uma forma de onda periódica é gerada e uma série de pulsos de arco eléctrico é produzida entre um arame-eletrodo e a raiz da junta da tubulação (duto).

A forma de onda de corrente de soldagem proposta e o comportamento da gota do metal depositado são mostrados na Figura 2.8. A mudança imposta no ciclo é feita a partir do comportamento de tensão dinamicamente monitorada junto aos parâmetros programados (tempos e correntes) pelas rotinas de controle da fonte. Na fase A, a gota de metal depositado cresce até a fase B, quando encosta na poça de fusão e acontece o curto-circuito. Neste instante, a corrente deveria subir e a tensão cair, mas neste momento a corrente é reduzida para um nível baixo, permitindo que a gota se junte com a poça de fusão devido à força de tensão superficial (este tempo é a priori programado). Na fase C, a onda de corrente sobe levemente e, com este aumento, a força eletromagnética cresce consideravelmente, aumentando o efeito pinch da ponte de metal líquido neste momento. Na fase D, depois de um certo tempo programado, reduz-se a corrente para produzir um mínimo de respingos (explosões) no início do reacendimento do arco. Na fase E, após a transferência metálica, o arco é reaberto com a aplicação de uma alta corrente após o curto-circuito, minimizando a probabilidade da ocorrências de curtos-circuitos acidentais, deixando a gota crescer.

Assim, o processo é continuamente repetido seguindo estas fases. A forma de onda e os tempos em algumas fases são programados; na fase A (posição 111 da Figura 2.8) a corrente é aproximadamente igual a 70 A, o valor da corrente de pico (posição 131 da Figura 2.8) é aproximadamente igual a 330 A e o valor da corrente média na posição 151 da

Figura 2.8 é aproximadamente igual a 210 A. Os autores explicam que na fase de crescimento da gota de metal depositado (fase A) pode ser usado corrente contínua ou corrente pulsada de até seis pulsos, sendo que o tempo desses pulsos pode durar de 1 até 3 ms. O tempo total de ciclo (indicação 101 da Figura 2.8) é aproximadamente igual a 15 ms.

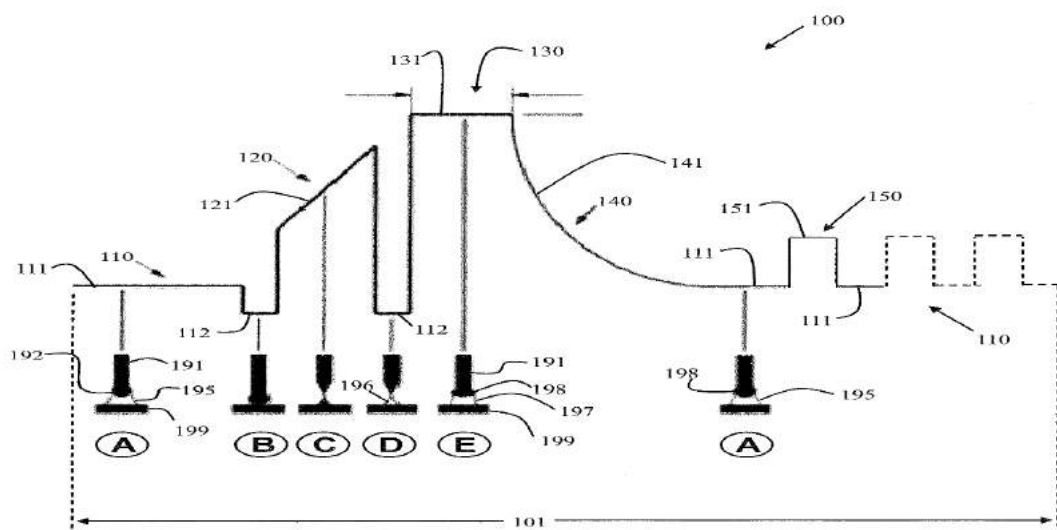


Figura 2.8 – Forma de onda da corrente de soldagem da patente *US 2009/0321402 (A1)* com comportamento do metal depositado (DOYLE et al.,2009)

Existem também outros métodos (técnicas e processos) que foram criados para soldagem de passe de raiz e que são similares ao processo STT, nos quais os tipos de transferência metálica (comportamento da gota em função da forma de onda de corrente de soldagem) são parecidos. Pode-se citar como exemplos os processos RMD (*Regulate Metal Deposition*) da fabricante americana *Miller Electric*, *Fast Root* da fabricante finlandesa *Kemppi*, CCC (Curto-Circuito Controlado) da fabricante brasileira *IMC Soldagem*, etc.

Posteriormente, Parker (1998) utilizou o processo STT para soldagem orbital e patenteou seu método para soldagem de tubos (*Method of the welding pipe – WO 1998015378 (A1)*). A Figura 2.9 mostra o sistema para soldagem dos tubos com seus elementos principais. A máquina de soldagem e seu alimentador de arame-eletrodo são montados e movimentados em um trilho do tipo cinta que abraça o tubo e permite fazer tecimentos pendulares da tocha (arame-eletrodo). O cabeçote de soldagem é alimentando por uma fonte STT. Os passes de raiz ou enchimento são feitos pela parte externa do tubo. Este método não utiliza cobrejunta. A máquina de soldagem (trator orbital) tem um painel de controle onde o operador pode ajustar manualmente os parâmetros do processo, como a velocidade de alimentação de arame-eletrodo, a velocidade de soldagem e o valor de corrente de soldagem. Parker advoga que, com seu trator para soldagem orbital

automatizada, o uso da STT já é suficiente para realizar soldagens de passes de raiz, não ponderando, no entanto, as tolerância para alinhamento do chanfro e nivelamento das paredes internas do tubo em que sua invenção se aplica.

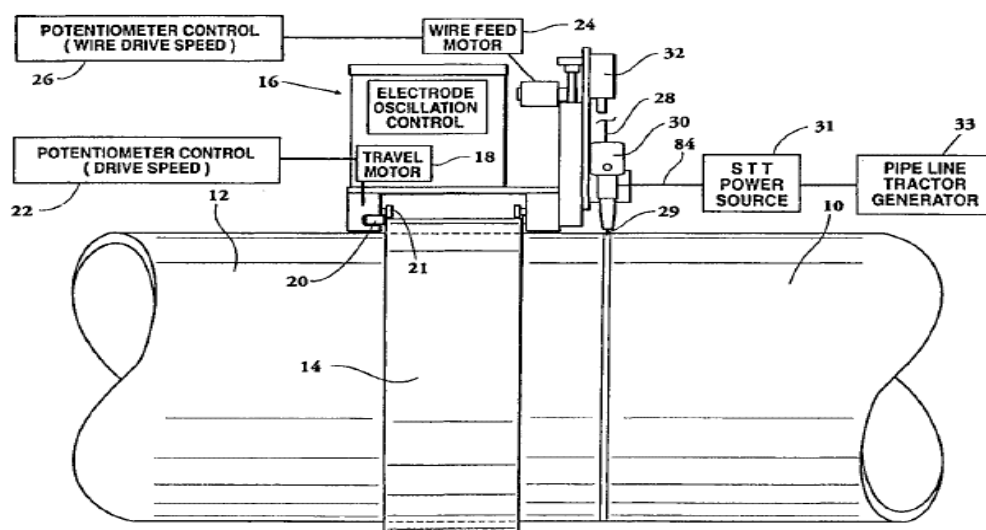


Figura 2.9 – Ilustração do sistema de soldagem orbital da patente WO 1998015378 (A1) com seus elementos principais, onde (10) e (12) são os tubos, (14) é o trilho do tipo cinta, (16) é a máquina de soldagem (trator com oscilador), (18) é o motor de deslocamento da máquina de soldagem, (24) é o motor do alimentador de arame-eletrodo e (31) é a fonte de soldagem STT (PARKER, 1998)

Mas outra forma de controle da corrente aplicado em soldagem MIG/MAG é o chamado MIG/MAG Pulsado. Mas especificamente quanto a formação do passe de raiz, demanda-se um controle maior do calor aportado quando se quer usar o MIG/MAG Pulsado. Os pesquisadores Stava e Myers (2007) criaram um sistema e método para soldagem com corrente pulsada (*System and method for pulse welding – US 7271365 (B2)*) para minimizar a energia aplicada para fusão e a agitação da poça, mas ainda garantindo a transferência de uma gota por pulso (UGPP). Neste caso, os sinais de soldagem (corrente e tensão) são constantemente monitorados e calculados para atingir um valor mínimo necessário da energia que garante UGPP e, a partir desse valor, minimizar a energia utilizada, evitando transferência por curto-circuito pela modificação dos níveis de corrente de soldagem utilizados. Esta patente menciona que os pulsos podem ser aplicados em corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA). O princípio de funcionamento com seus elementos principais é mostrado na Figura 2.10. O valor da energia sempre monitorado no tempo real e mudando através do valor padrão (um valor que garante a transferência UGPP)

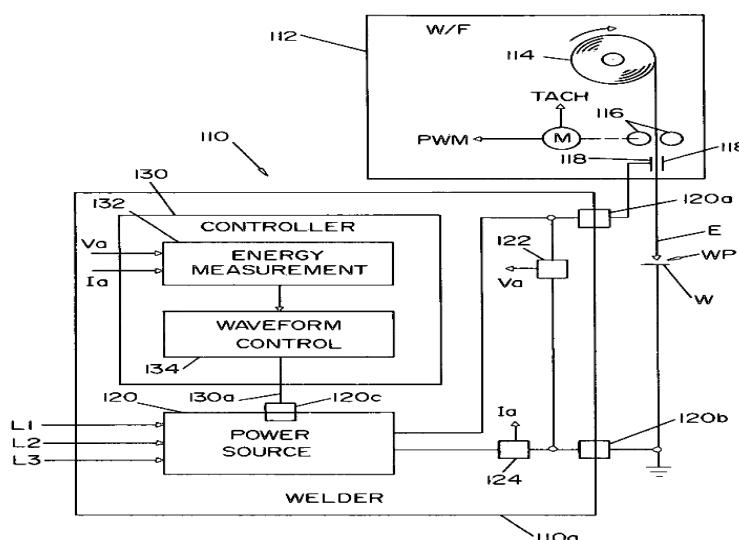


Figura 2.10 – Elementos principais do sistema para monitorar e controlar a transferência metálica da patente *US 7271365 (B2)*, onde (112) é o alimentador do arame-eletrodo, (110) é o sistema para monitorar e controlar a energia aplicada na poça de fusão, (120) é a fonte de soldagem especial, (122) é o sensor de tensão do arco e (124) é sensor da corrente de soldagem do tipo “shunt”, (130) é o controlador, (E) é o arame-eletrodo, (WP) é o arco elétrico e (W) é a peça soldada (STAVA; MYERS, 2007)

Scotti et al. (2004) registraram uma patente onde os pesquisadores desenvolveram um método e um equipamento para detectar a condição uma gota por pulso através de um sensor (fototransistor) de luminosidade do arco (*Luminescence sensing system for welding – US 20040034608 (A1)*). O objetivo foi detectar a transferência por voo livre com condição de UGPP no fim de cada pulso. Este método, com muito boa precisão, pode detectar a condição de UGPP para diferentes valores médias de corrente pulsada, ajustando, em caso de desvios, os parâmetros de corrente de soldagem (manualmente ou automaticamente), como velocidade de alimentação, corrente média, os valores de corrente média e base, os tempos de pulso e base etc.

A técnica de controle da poça de fusão pelo controle dos parâmetros elétricos (curto circuito controlado ou pulsado com uma gota por pulso), usada pelos pesquisadores Doyle et al. (2009), Parker (1998), Stava e Myers (2007) e Scotti et al. (2004), foi aproveitada na presente proposta, mas a abordagem difere bastante, já que estes inventores não alteram os parâmetros de acordo com a posição da tocha.

William (1972) registrou sua patente (*Automatic pipeline welding method – US 3668360 (A)*), na qual desenvolveu um método para soldagem orbital de tubos por MIG/MAG com alta velocidade de soldagem, utilizando o modo de transferência metálica por curto-circuito. Um distintivo desta patente é que o eletrodo é ligado paralelamente em duas fontes de energia, uma delas do tipo tensão constante e outra é corrente contínua, como

ilustra a Figura 2.11. O método serve para executar todos os passes de soldagem de tubo, ou seja, passe de raiz, enchimento e acabamento. Para o passe de raiz é utilizada um cobrejunta de metal não consumível, posicionada sob a abertura de raiz da junta.

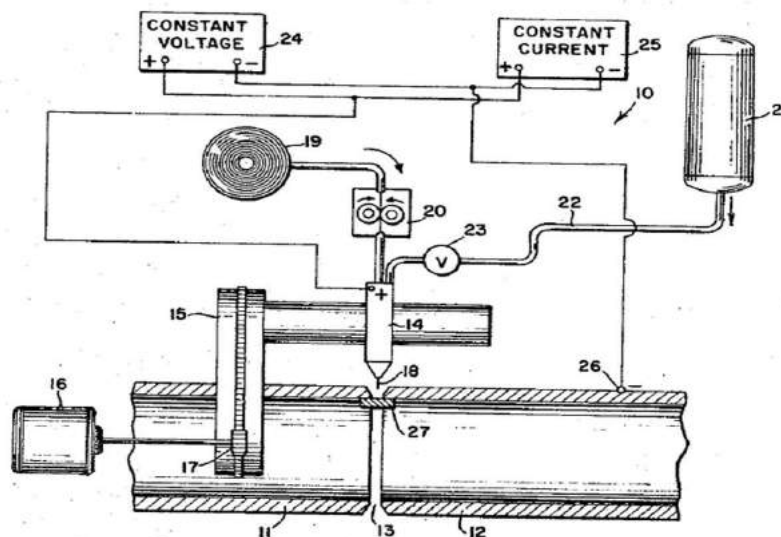


Figura 2.11 – Esquema de equipamento utilizado na patente *US 3668360 (A)* com seus elementos principais, onde (11) e (12) são os tubos a serem soldados, (13) é o chanfro da junta, (14) é a tocha, (15) é o suporte para movimentar orbitalmente a tocha, (18) é o arame-eletrodo, (21) é o cilindro de gás de proteção, (24) é a fonte do tipo tensão constante, (25) é a fonte do tipo corrente contínua e (27) é o cobrejunta (WILLIAM, 1972)

Os motivos para a invenção foram algumas limitações na época (1972) ainda existentes na soldagem automatizada de tubos com processos com proteção gasosa, a saber, a velocidade de soldagem relativamente baixa e a dificuldade de garantir automaticamente o alinhamento entre o curso da tocha e centro de folga do passe de raiz, que sempre necessita a presença de um operador. Os autores citam que encontraram a proposta de aumentar a velocidade de soldagem através do aumento do diâmetro de eletrodo, mas, como a força de arco cresce (em função do corrente), o eletrodo começa empurrar a poça de fusão, causando uma instabilidade de formação de cordão e até a fusão de cobrejunta. Outra limitação seria a incapacidade de combinação de um diâmetro relativamente grande de eletrodo com a transferência por curto-circuito, porque iria entrar em transferência globular, que não é adequada na soldagem fora de posição plana. Assim, o diâmetro de eletrodo foi limitado ainda nas fases iniciais do projeto.

A condição para soldagem com alta velocidade, transferência por curto-circuito, usando uma taxa de metal de adição elevada e, ao mesmo tempo, não influenciar na poça de fusão, foi conseguida, para uma dada regulagem de velocidade de alimentação, pela

medida que o nível de corrente fornecida pela fonte de alimentação de corrente contínua fosse aumentada, a corrente fornecida pela fonte de energia de tensão constante diminuía, impedindo o aumento da força do arco. A força do arco é controlada pela regulação da corrente da fonte de corrente contínua. Não fica claro pelo texto da patente como ele faz esse controle das duas fontes, mas pode-se imaginar que a redução da corrente pela fonte de tensão constante se faria pela tendência do aumento do arco quando do aumento da corrente na fonte corrente contínua, para uma dada velocidade alimentação do arame. Assim, a corrente média seria função da regulação da fonte de corrente contínua, ficando a fonte de tensão constante para ajuste fino.

Mas pelo texto, a Figura 2.12 mostra gráficos de características estáticas da fonte de tensão constante para explicar como as forças do arco são controladas pela outra fonte (de corrente contínua) conseguindo altas velocidades de alimentação do arame-eletrodo com transferência por curto-circuito. O ponto X da Figura 2.12 é a corrente correspondente a uma velocidade de alimentação (F_2) ajustada na fonte tensão constante. Esta condição para uma regulação de tensão na fonte (P_1) vai corresponder a um ponto de trabalho Q. Quando feita a ligação da fonte de corrente contínua com um certo valor de corrente, cria-se um novo ponto no eixo de abscissa que é X_1 (maior corrente), permitindo-se aumentar, assim, a velocidade de alimentação (F_4). Como no eixo de ordenada a tensão P_1 continua com mesmo valor, muda-se o ponto de trabalho para Q_3 , que tem alta velocidade de alimentação do arame-eletrodo com transferência metálica por curto-circuito.

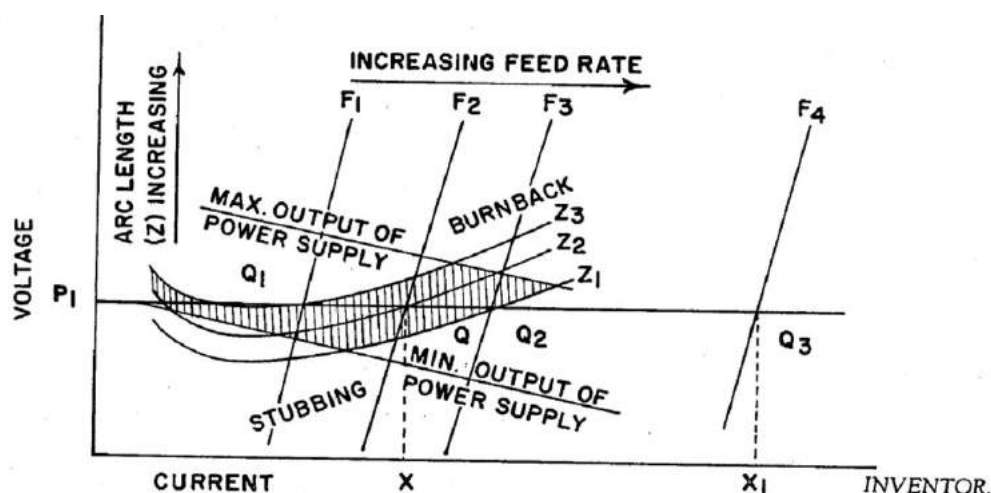


Figura 2.12 – Característica e estática de regulação dos parâmetros da fonte tensão constante da patente US 3668360 (A), onde (F_n onde $n = 1, 2, 3, n$) é a velocidade de alimentação, (P) é o nível de tensão regulado na fonte, (Q_n onde $n = 1, 2, 3, n$) são os pontos de trabalho e (Z_n onde $n = 1, 2, 3, n$) são os comprimentos do arco elétrico (WILLIAM, 1972)

Com a força do arco diminuiu, o arame-elétrodo pode ser alimentado para a poça de fusão com as taxas elevadas sem risco de perfuração, enquanto que a corrente da fonte de corrente continua compensa a corrente perdida a partir da fonte de energia de tensão constante e fornece a energia necessária para fundir o arame-eletrodo e obter consistentemente cordões de solda com boa qualidade no modo de circuito curto de solda em taxas de avanço substancialmente mais elevados. O controle da força do arco desta maneira permite aumentar a velocidade de alimentação. Isto é bem vantajoso, uma vez que, a fim de obter as velocidades mais rápidas de soldagem em torno do tubo e ainda depositar um volume de metal suficiente para junta soldada.

Para soldagem de passe de raiz, a tensão de saída da fonte de tensão constante é mantida a um nível dentro da faixa de 19 a 25 V, enquanto a velocidade de alimentação está em uma faixa de 12,7-22,9 m/min, que estabelece um curto-circuito. O nível de corrente fornecida pela fonte de corrente continua é de pelo menos abaixo de 160 A.

A invenção apresentada nesta patente mostra alto nível e boa ideia dos pesquisadores. O que se procura, como no trabalho proposto, é se trabalhar com baixa pressão do arco para aumentar a estabilidade da poça. Mas este método ainda difere da técnica apresentada neste trabalho pelo uso de cobrejunta, velocidades de soldagem elevadas e, principalmente, por não apresentar nenhuma proposta para controlar a distribuição de calor na poça de fusão.

2.3 – Controle da poça de fusão através da oscilação da tocha

Verni (1928) em sua patente (*Automatic arc welding – US 1667585 (A)*) descreveu a sua invenção para melhorar uma soldagem de fusão, mais particularmente, uma máquina automática que forneça uma oscilação da fonte de calor (ponta do eletrodo) durante seu percurso ao longo da junta. Isto no fim da terceira década do século passado. A Figura 2.13 mostra a esquema da máquina proposta por Verni, onde uma tocha de soldagem está disposta de modo a ser operada em qualquer forma adequada para a produção de um movimento relativo entre o arame-eletrodo (1) e chapa (2) ao longo da linha cordão (3). A tocha de soldagem (4) é fixada num pino (5) que se localiza numa base (6). A tocha de soldagem está também ligada por uma roda de mão (13) para ajustar o eletrodo na direção transversal à linha de solda. A roda de mão (14) é para ajustar velocidade de alimentação. O tubo-guia (10), um cano derivado (11) e o bico de contato (12) oscilam juntos em relação ao ponto de pivô (15) por um mecanismo de oscilação que compreende dos vários elementos (19-34), incluindo um came (excêntrico).

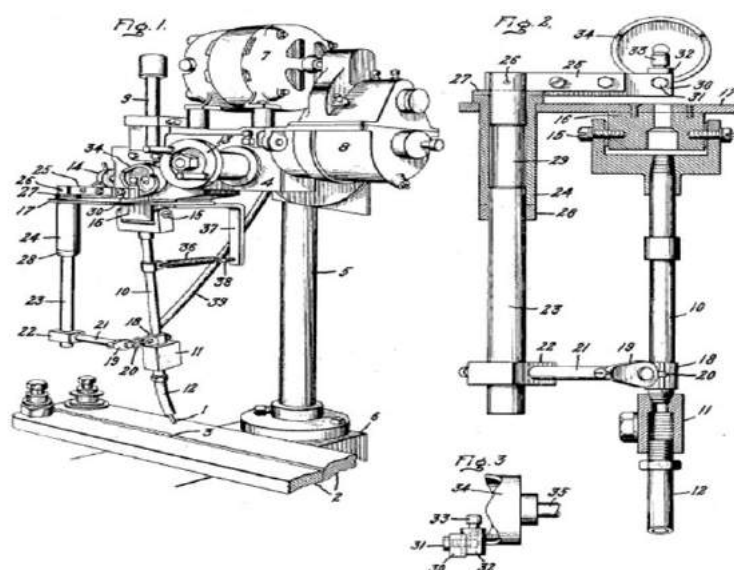


Figura 2.13 – Esquema de máquina para soldagem automatizada com mecanismo de tecimento transversal da patente *US 1667585 (A)* (VERNI, 1928)

A vista esquerda da Figura 2.14 mostra o caminho de tecimento e o cordão correspondente obtido pelo mecanismo de oscilação utilizado no passado antes da invenção de Verni. Deve ser apontado que por esse percurso o eletrodo segue um caminho de onda senoidal, passando rapidamente através da linha de centro e lentamente nas extremidades de tecimento. No caso de soldagem de juntas de topo sem chanfro, este tipo de tecimento pode causar falta de material no centro. Mas pela invenção, uma trajetória diferente para a solda, como mostrado na vista direita da Figura 2.14 é executada pelo caminho irregular de tecimento e o correspondente cordão sofre melhoramentos geométricos. Como se vê, o percurso mantém o eletrodo mais perto da linha de centro durante maior parte do tempo do que em relação ao percurso da onda senoidal, oferecendo assim mais calor no centro de junta e em seguida maior deposição de material no centro. Desta forma, o autor mostra que melhorou o caminho de oscilação do eletrodo para controlar a distribuição de calor.

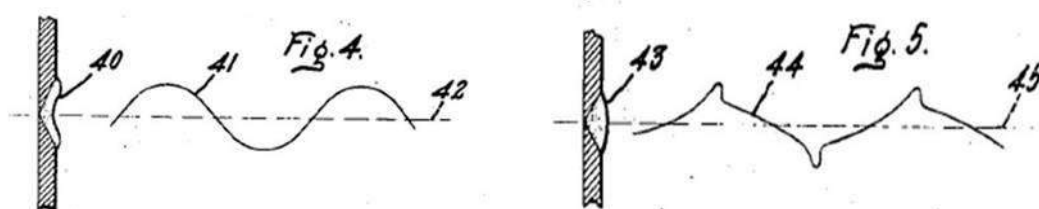


Figura 2.14 – Trajetórias de tecimento transversais da patente *US 1667585 (A)*, onde o percurso da parte esquerda (Fig. 4) é o caminho dos sistemas antes da invenção e o percurso da parte direita (Fig. 5) é o aperfeiçoado em relação ao precursor (VERNI, 1928)

A patente não tem muita ligação com o método apresentado neste trabalho, mas constitui uma forma para melhoramento da geometria do cordão, com destaque para o impacto de tecimento transversais na soldagem, como uma forma para distribuir o calor e metal depositado na junta soldada. Tecimento é uma forma obrigatória a ser usada na confecção de passes de raiz.

Belloni e Bonasorte (2002) patentearam seu método e equipamento (*Apparatus and method for welding pipes together – US 6429405 (B2)*) para realizar passes de raiz em soldagem orbital em tubos, em junta em V com estreita abertura da mesma. Este método permite realizar o processo de soldagem em baixo d'água (subaquática) ou em soldagem normal. Pela sua invenção, a máquina tem duas tochas, localizadas uma atrás de outra (duplo arco) e guiadas por um trator, que se movimenta em volta do tubo a uma dada velocidade pré-determinada (Figura 2.15). As tochas oscilam independente entre as paredes do chanfro na forma não sincronizada.

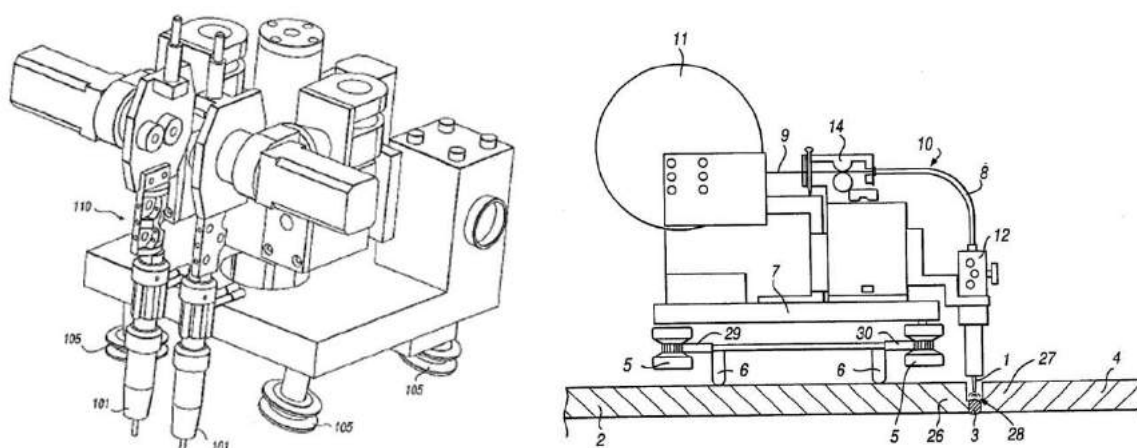


Figura 2.15 – Trator com duas tochas para soldagem de passes de raiz pela patente *US 6429405 (B2)* com seus elementos principais, onde (1) é o arame-eletrodo, (2) e (4) são os tubos, (3) é o cordão de solda, (28) é o chanfro e (101) são as tochas (BELLONI; BONASORTE, 2002)

A máquina tem sistema de controle que permite automaticamente reconhecer o chanfro da junta soldada pela impedância do arco elétrico. Os parâmetros de soldagem monitorados são corrente, tensão e impedância. A Figura 2.16 mostra o bloco-diagrama de auto controle de posição do arco elétrico (tocha) em relação do chanfro (borda) de tubo do tipo “malha fechada”, que monitora a impedância do arco elétrico em tempo real e manda um sinal para os dois filtros responsáveis por um dos dois lados da junta. Em seguida, o diferenciador reconheça a posição da tocha e decide mandar ou não mandar o sinal para o motor de oscilação trocar a direção de movimento.

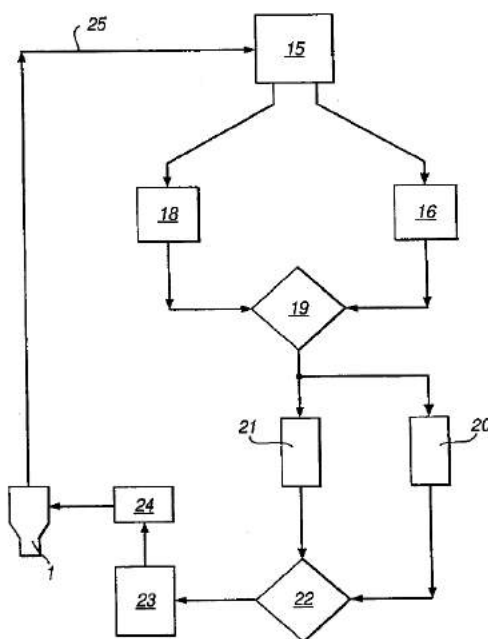


Figura 2.16 – Bloco-diagrama de controle de posição da máquina e sua tocha de soldagem pela patente *US 6429405 (B2)* com seus elementos principais, onde (1) é a tocha, (15) é o elemento de medição da impedância do arco elétrico, (16) é o filtro responsável pelo chanfro direito da junta, (18) é o filtro responsável pelo chanfro esquerdo da junta, (19) é o diferenciador que indica (calcula) a posição do arco dentro do chanfro, (20) é o integrador, (21) é o amplificador (“*gain unit*”) do sinal, (22) é o amplificador, (23) é o elemento de acionamento, (24) é o central regulador do sistema que movimenta a tocha e (25) é o cabo (BELLONI; BONASORTE, 2002)

Este método de soldagem não utiliza cobrejunta no passe de raiz e, primeiro, permite que automaticamente se reconheça a posição do arco em relação da junta, de extrema importância para o caso de desalinhamento das paredes da junta. Como o equipamento desta invenção inclui duas tochas, os autores tentam não concentrar energia de calor numa poça só e espalhar ainda mais usando tecimentos transversal. Mas não tem nenhuma informação sobre o controle da energia (calor) da poça de fusão na forma que propõe presente trabalho, como aquecer laterais e resfriar no meio da junta.

Roen (1981) desenvolveu um dispositivo para oscilação do arame-eletrodo em processos a arco (*Arc welding apparatus with oscillating electrode – US 4295031 (A)*). No caso, a invenção foi feita para processo MIG/MAG, onde o próprio arame-eletrodo oscila longitudinalmente ou transversalmente através de uma eletroímã montada dentro da tocha. A Figura 2.17 mostra a seção transversal da tocha com seus elementos principais. Os autores fizeram esta invenção para homogeneizar a distribuição de calor forçando o destacamento das gotas sempre ao fim do curso do tecimento, por um impulso. No caso, a

de ancoramento (suporte) na parte vertical do metal de base. Depois que as partes da junta são posicionadas, o passe de raiz é realizado. Os autores mencionam que este método ajuda a minimizar o perigo de perfuração, produzindo cordões com boa aparência e qualidade na face de raiz.

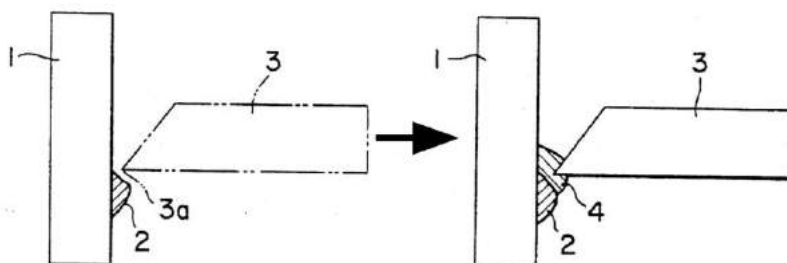


Figura 2.18 – Princípio de realização do método de soldagem da patente *US 5202546 A*, onde (1) e (3) são as partes que foram soldadas, (2) é o passe de ancoramento, (3a) é o chanfro e (4) é o passe de raiz (HASEGAWA et al., 1993)

Masakatsu e Shunji (2003) desenvolveram um método para soldar passes de raiz em tubos acessando apenas o lado externo dos mesmos (*Single side welding method of conduit and pipe – JP2003048067 (A)*), aparentemente utilizando o princípio de Hasegawa et al. Os autores realizam o processo de soldagem camada por camada aumentando a espessura das paredes da junta como que formando um cobrejunta (suporte) ou semelhante, que não funde por uma fonte de calor de soldagem na junta soldada sem a utilização de qualquer cobrejunta durante soldagem. Uma parte do metal de base é chanfrada e outra não, sendo que a parte que é chanfrada vai ser preenchida e vai fundir e unir a outra parte. Desse modo, a espessura das chapas (partes) soldadas pode ser aumentada. O processo de soldagem é multipasse e pode ser feito manualmente por um soldador. A Figura 2.19 mostra o esquema de preparação da junta pela presente invenção e já a Figura 2.20 ilustra passo a passo (de direita à esquerda) do método de soldagem dos tubos de um lado. Como a presente patente é em japonês e apenas o abstract é em inglês.

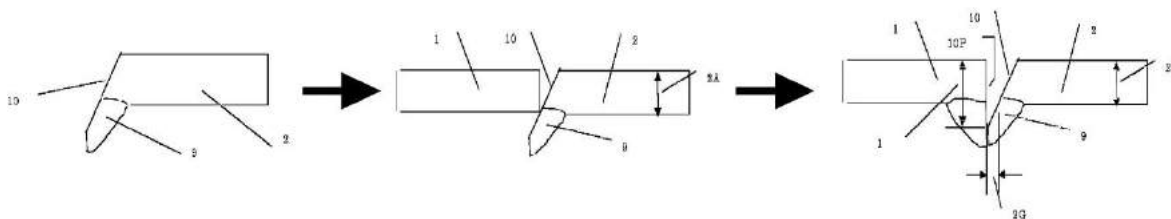


Figura 2.19 – Esquema do método de preparação da junta para soldagem dos tubos de um lado (sequência da esquerda para direita) da patente JP2003048067 (A) com seus elementos principais, onde (1) e (2) são os tubos, (9) passes de selamento, (10) é o chanfro, (1A) é a espessura de tubo e (1G) é a folga (MASAKATSU; SHUNJI, 2003)

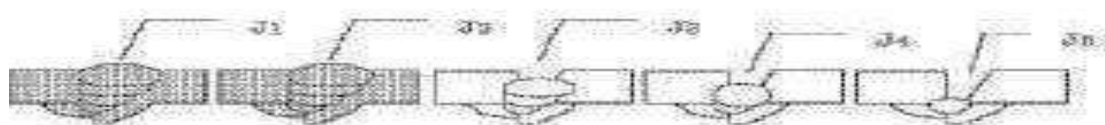


Figura 2.20 – Esquema do método de soldagem dos tubos de um lado (sequência da direita para esquerda) da patente JP2003048067 (A) (MASAKATSU; SHUNJI, 2003)

2.5 – Controle da poça de fusão através de resfriamento da mesma

Chiba et al. (1980) em sua patente (*Method of cooling weld in steel piping and apparatus therefor – US 4223197 (A)*) propõem um método para resfriamento da poça na soldagem de tubos com arrefecimento das bordas soldadas dentro de tubo, depois de execução de passe de raiz, através de passagem de um líquido de temperatura ambiental, numa direção entre as direções radiais e tangenciais em relação à superfície interior do tubo. A Figura 2.21 apresenta o esquema ilustrativa de método com seus elementos principais, onde o aparelho utilizado neste trabalho compreende de uma montagem multi-bico que pode perfazer o raio de rotação correspondente ao diâmetro inteiro do tubo e é capaz de vazar o fluido para esfriar a superfície interior do tubo. O aparelho consiste dos cabos para transmitir o líquido para os bicos, bicos e um dispositivo de bombeamento para forçar o meio de arrefecimento sob pressão para os bicos.

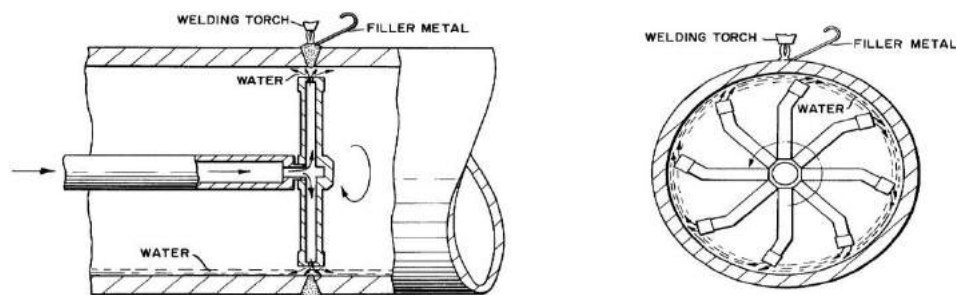


Figura 2.21 – Esquema ilustrativo do princípio do método, com seus elementos principais, da patente *US 4223197 (A)* (CHIBA et al., 1980)

O método foi desenvolvido para aplicar em soldagem nas indústrias químicas e nucleares. Como objetivo principal, o método e um aparelho adequado têm a redução das tensões residuais e a minimização precipitação de carboneto nas superfícies internas dos cordões de tubos de aço inoxidável austenítico, que pode ser aparecido em ambientes corrosivos. Assim, essa patente apresenta método de um resfriamento muito potente da poça de fusão, só que utilizando para passes de enchimento.

Os pesquisadores Riyouichi, Suteto, Kiyoshi (1982), pelo resumo de sua patente (*Method for welding tubular member – JPS58154487 (A)*), sugeriram um método para redução da larguras das zonas afetadas pelo calor (ZAC) e obtenção de cordões de alta qualidade, pelo resfriamento interior de tubo com líquido (água). Os dois tubos (Figura 2.22), após a confecção do passe de raiz, recebe um fluxo de líquido pulverizado pelo lado interior nos cordões de solda. O líquido chega através de tubo (8c) e se distribui pelos furos (8a, 8b). Durante as soldagem dos passes de enchimento (7), o fluxo de líquido arrefece assim os lados interiores das zonas de soldagem.

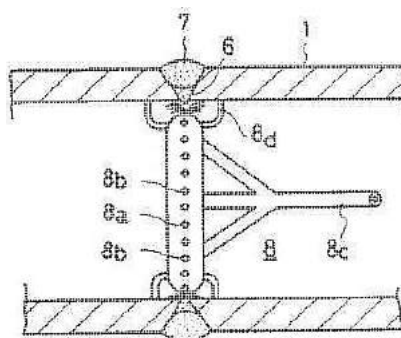


Figura 2.22 – Ilustração do esquema do processo com seus elementos principais da patente *JPS58154487 (A)*, onde (1) é o metal de base (tubo), (6) é o passe de raiz, (7) é o passe de enchimento, (8) é o mecanismo de refrigeração dos passes de enchimento, (8a) e (8b) são os furos para pulverizar líquido para zonas de solda, (8c) é o tubo para fornecer líquido e (8d) são os suportes de mecanismo (RIYOUICHI; SUTETO; KIYOSHI, 1982)

As patentes desenvolvidas por Chiba et al. (1980) e Riyouichi, Suteto, Kiyoshi (1982) se resumem em um método de controle da temperatura (resfriamento) dos passes de enchimento e acabamento. A diferença aparente entre elas está no método de arrefecimento, o primeiro de forma giratória, enquanto a segunda de forma estática. De qualquer forma, são bem diferentes do que propõe este trabalho, mas servem como bons exemplos de eficácias da abordagem de esfriamento da poça para estabilização da mesma.

Os cientistas Hiroshi, Motoji e Satoshi (1980) propõem na forma resumida um método auxiliar para soldagem á arco elétrico para formar passe de raiz (*Arc welding method – JPS5550974 (A)*). O objetivo principal foi conseguir um reforço adequado na parte de baixo da raiz, através de emissão de um fluxo do gás (vazão controlada) em direção contrária à direção da força de gravidade de metal fundido, enquanto o cordão, e a protuberância do reforço da raiz, estão se solidificando. A Figura 2.23 ilustra o princípio do método e principais partes. Os tubos de aço ao carbono (1) estão sendo soldados em junta de topo com chanfro de tipo “V”, por uma tocha de soldagem (3), enquanto o fluxo de gás (14) está orientado em direção oposta de ação da força de gravidade do metal liquido a partir de um tubo de alimentação de gás (13). Graças à pressão do fluxo de gás, favorece-se o suporte da poça fundida e a aceleração da solidificação da mesma e, assim, evitando o escorrimento da raiz (2).

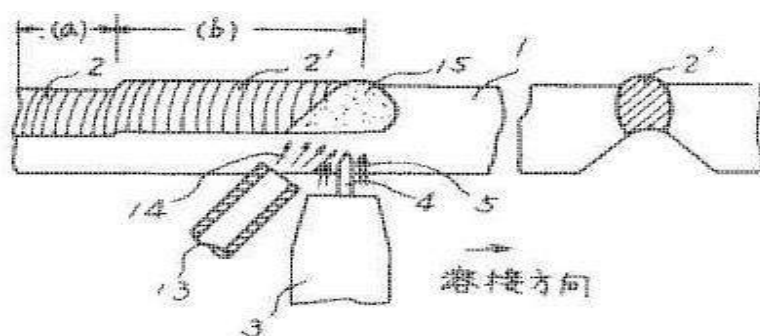


Figura 2.23 – Ilustração do princípio do método da patente *JPS5550974 (A)* e seus elementos principais, onde (1) é o metal de base (tubos), (2) é o cordão de solda, (3) é a tocha TIG, (4) é o eletrodo de tungstênio, (5) é o gás de proteção, (13) é a mangueira com gás de injeção, (14) é o fluxo de gás de injeção e (15) é a poça de fusão (MOTOJI; SATOSHI, 1980)

A invenção de Hiroshi, Motoji e Satoshi (1980) já se assemelha em parte com os objetivos da presente proposta, por resfriar a poça fundida para evitar escorrimento. Mas difere no sentido que na presente proposta se tenta fazer este resfriamento pela redução do

calor imposto enquanto o arco se situa na parte central do chanfro, enquanto pela citada invenção este arrefecimento se dá por um fluxo de gás externo.

2.6 – Controle da poça de fusão pela variação dos parâmetros elétricos ao longo da junta e outros equipamentos especiais

Takao e Kunio (1982) desenvolveram e patentearam um método que denominaram de soldagem com tecimento (*Weaving welding method - JPS5741886 (A)*). Uma novidade dessa patente é o uso de maior energia imposta nas laterais dos chanfros do que no centro. Isto é conseguido usando-se o processo TIG com adição de arame, com tecimentos pendulares da tocha dentro de chanfro, como ilustra a Figura 2.24. O valor da corrente de soldagem é mais elevado nas bordas dos chanfros da junta (posições 7a e 7b da Figura 2.24), com tempo de parada lateral, e menor no meio da junta, sem parada central. Os autores anunciam que, com esse procedimento, a região de solda fica sem defeitos e com maior eficiência de trabalho. Os autores no resumo da patente (em idioma inglês) não explicam como fizeram para reconhecer onde está a lateral e o meio do chanfro para alterar a corrente de soldagem no momento certo (mais informações não foram levantadas em virtude de se ter acesso somente ao resumo desta patente). Esse método, apesar de alguma semelhança com objeto do presente trabalho, se aplica para processo TIG e passes de enchimento e não formação do passe de raiz. Além disto, ao mudar a intensidade de corrente, aparentemente não é alterado o modo operacional.

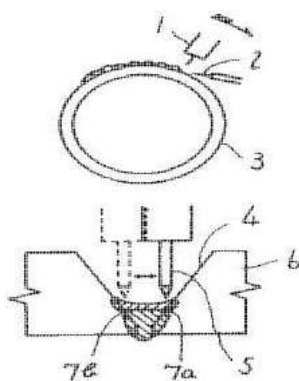


Figura 2.24 – Ilustração do processo de soldagem da patente *JPS5741886 (A)* com seus elementos principais, onde (1) é a tocha TIG, (2) é o metal de adição, (3) é o tubo a ser soldado, (4) é o chanfro de tubo, (5) é o eletrodo de tungstênio, (6) é a região da junta, (7a e 7b) são as laterais fundidas do chanfro (TAKAO; KUNIO, 1982)

Richard e Richard (2003) desenvolveram e patentearam um sistema que permite em tempo real detectar e regular a penetração ao longo de soldagem MIG/MAG (*Welding arc*

penetrating power real-time detection system – US 6518545 (B1)) pelo valor de impedância ($Z=U/I$) ou intervalo de tempo entre pulsos. A invenção foi desenvolvida para fazer controle adaptativo dos parâmetros governantes da formação do passe de raiz em juntas de topo de tubos na soldagem orbital sem utilização cobrejunta. O sistema monitora os parâmetros elétricos (tensão U e corrente I) do processo de soldagem MIG/MAG e calcula um índice, como o valor da impedância Z . De acordo com os inventores, o formato da onda de corrente e tensão varia caso a solda esteja na condição otimizada ou não otimizada (entrando em colapso da poça), de tal forma a se criar padrões para os índices.

O princípio do sistema de controle adaptativo é baseado numa base de valores padrões de impedância (ou outro índice) para soldagens típicas de passes de raiz em tubos. De forma comparativa, o sistema confronta o valor constantemente medido com o valor padrão, e, assim, controla a penetração da poça de fusão no tempo real. A Figura 2.25 esquematiza o sistema, onde o sistema computacional (posição 70) adquire os sinais analógicos de tensão e corrente, condiciona os mesmos digitalmente, calcula a impedância dinâmica, converte os valores digitais em analógico e manda seu valor para uma EEPROM (posição 35). Essa EEPROM, pelo valor da impedância, compara os valores recebidos com os valores padrões armazenados em um computador (posição 36) e manda os parâmetros para a fonte de energia (posição 14) para mudar ou não a forma de onda de corrente e tensão, seja para o alimentador de arame-eletrodo (posição 15) (controlando a velocidade de alimentação do arame-eletrodo), ou para o oscilador da tocha (posição 16) (controlando a frequência de tecimento da tocha) ou para máquina de solda (posição 10) (regulando a velocidade de soldagem). Segundo os autores, o processo permite soldagens orbitais sem cobrejunta, principalmente em juntas de topo, com ou sem abertura de raiz (folga).

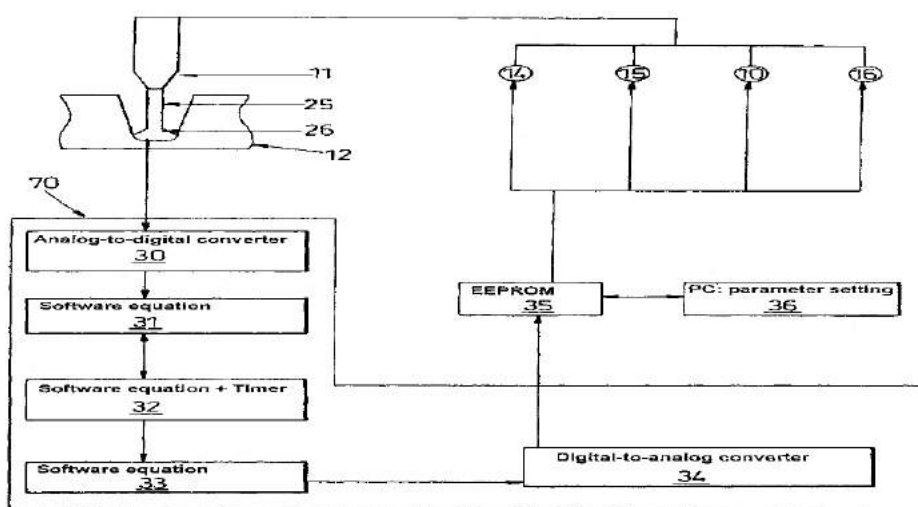


Figura 2.25 – Sistema de auto controle e ajuste dos parâmetros de soldagem pela impedância da patente *US 6518545 (B1)*, com seus elementos principais, onde (10) é a

máquina de solda, (11) é a tocha de soldagem, (12) é o tubo a ser soldado, (14) é a fonte de energia, (15) é o alimentador de arame-eletrodo, (16) é o oscilador da tocha, (25) é o arame-eletrodo, (26) é o arco elétrico, (30) é o conversor analógico-digital da corrente e tensão do arco, (31) é o software com equação, (32) é o software com equação e relógio regressivo para calcular segunda vez o valor da impedância, (33) é o software com equação, para calcular segunda vez a impedância, (34) é o conversor digital-analógico do índice calculado, (35) é o processador de autocontrole (EEPROM), (36) é o computador com a base dos parâmetros padrões e (70) é o sistema computacional que calcula a variação da impedância (RICHARD; RICHARD, 2003)

Fafard et al. (1988) criaram um método e equipamento semelhante ao de Richard e Richard (2003) para controlar a penetração durante a soldagem de passe de raiz em juntas de topo com abertura (*Method and apparatus for controlling root pass weld penetration in open butt joints – US 4733051 (A)*) por soldagem circunferencial. Eles também usaram padrões de comparação para definir a conformidade da poça durante a soldagem, mas Fafard et al. propôs controlar a penetração pelo reconhecimento geométrico da poça de fusão. O princípio de funcionamento deste método (sistema) é baseado em imagens feitas por uma câmera (sensor visual). Quando o sistema de controle recebe uma imagem completa da poça de fusão, esta imagem é processada através de um computador, analisando a linha de contorno da poça de fusão em comparação com o contorno padrão (Figura 2.26). Através desta análise, o computador de controle emite os sinais de controle para os elementos da máquina para mudar/ajustar parâmetros de soldagem, tais como oscilação da tocha, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame-eletrodo e tensão do arco.

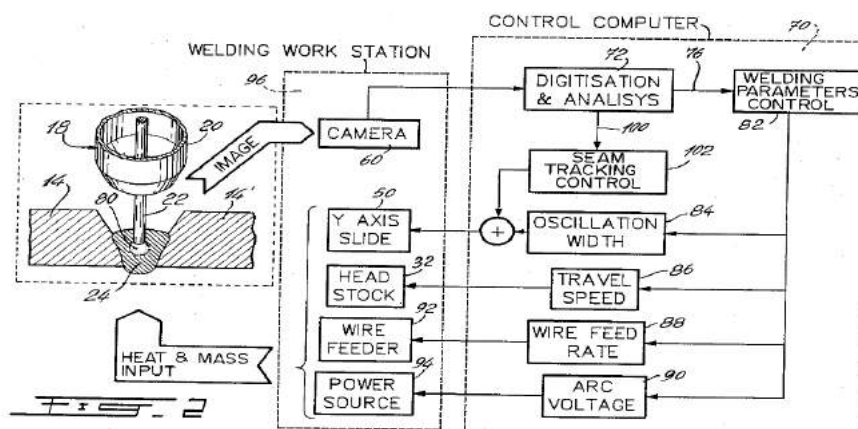


Figura 2.26 – Princípio de funcionamento do controle da penetração da patente *US 4733051 (A)*, onde (14 e 14') são os tubos a serem soldados, (18) é a tocha de soldagem, (22) é o

arame-eletrodo, (24) é a poça de fusão, (70) é o computador de controle, (80) é o arco elétrico e (96) é a estação de soldagem que inclui a câmera (60) (FAFARD et al., 1988)

A Figura 2.27 mostra uma vista em perspectiva do equipamento com seus elementos principais, onde o sensor visual (a câmera do tipo CID - *Charged-injection Imaging Device*), para identificar a geometria da poça, é posicionado à frente das tochas de soldagem (inclinada de um ângulo β), assim obtendo a imagem completa (frontal) da poça de fusão e definindo uma linha de contorno da mesma. A soldagem é realizada na posição plana com o eixo girado com uma velocidade de soldagem, controlada através do cabeçote (posição 32 da Figura 2.27). O equipamento inclui duas tochas de soldagem que estão montadas uma atrás de outra, que podem fazer tecimentos transversais, pela trajetória C da Figura 2.27, ao longo do processo de soldagem.

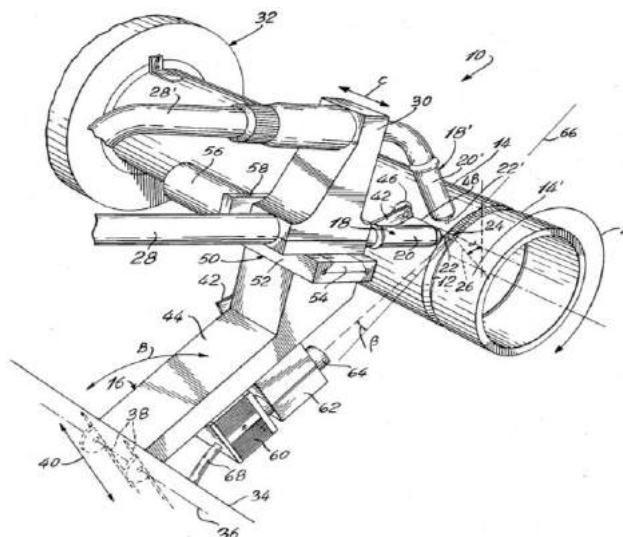


Figura 2.27 – Vista do equipamento de acordo com a patente *US 4733051 (A)*, cujos elementos principais são os tubos a serem soldados (14) e (14'), as tochas de soldagem (18) e (18'), o cabeçote para rotacionar os tubos (32), a câmera de vídeo do tipo CID (*Charged-injection Imaging Device*) (60), (A), (B) e (C) são as trajetórias das partes moveis do equipamento e (β) é o ângulo de inclinação do sensor visual em relação da poça de fusão (FAFARD et al., 1988)

A semelhança entre as patentes de Fafard et al. (1988) e Richard e Richard (2003) com a técnica apresentada neste trabalho é, além da aplicação em soldagem orbital/circunferencial de tubulações/duros na forma automatizada, sem utilização cobrejunta, a alteração dos parâmetros durante a soldagem para estabilizar a poça de fusão. Explicitamente ou não, procuram obter esta estabilização pelo controle da viscosidade da poça de fusão para evitar o colapso da poça. Porém, fazem isto através de

um algoritmo que calcula um index/geometria e o compara dinamicamente com valores padrões pré-definidos. Sendo assim, não distribuem o calor de forma sincronizada, aquecendo nas laterais e resfriando no meio da junta como forma de estabilização da poça.

Já Stava, Hsu e Nicholson (2006) desenvolveram e patentearam recentemente um método diferenciado dos acima mencionados para controle da poça de fusão, monitorando o valor de tensão do arco elétrico (*Method and apparatus for electric arc welding – EP1036627 (B1)*) utilizando preferencialmente um equipamento de soldagem STT. A base da invenção foi a de controlar o calor da poça de fusão na soldagem de passes de raiz com abertura de raiz (folga) através da detecção da variação da distância bico de contato-peça eléctrodo (DBCP) e de um auto ajuste da corrente de soldagem, resolvendo o problema apresentado pelas variações na folga (desalinhamento) da junta. Como ilustrado pela Figura 2.28, em (a) e (c), a folga era pequena e grande, respectivamente, provocando falta ou excesso de penetração quando a técnica não é utilizada, mas sendo corrigido o problema com o uso da técnica ((b) e (d)).

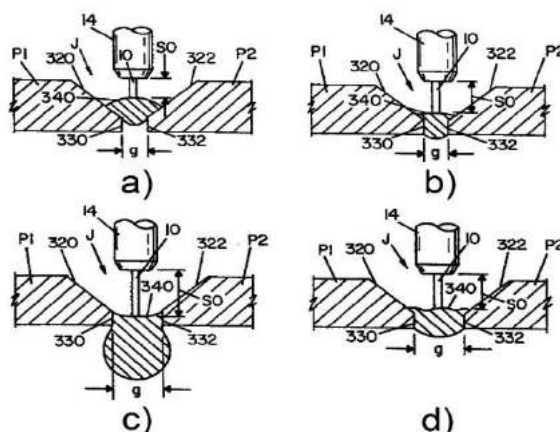


Figura 2.28 – Condições de variação de folga durante a soldagem e suas consequências, sendo as figuras à esquerda o comportamento da solda sem o uso da técnica e à direita com o uso da técnica: as figuras de cima com folga pequena e as de baixo com folgas grandes (STAVA; HSU; NICHOLSON, 2006)

A Figura 2.29 ilustra o princípio de funcionamento do método de controle da poça de fusão proposto por Stava et al. (2006). O arco faz um tecimento de um lado ao outro da junta. Além disto, devido às características do processo STT, por exemplo, a corrente não muda sozinha quando o arco aumenta ou diminui, como acontece nos processos MIG/MAG convencionais operando no modo tensão constante (auto-controle de comprimento de arco). Quando a poça afunda em relação a um perfil de poça (mostrando tendência de escoamento), ou quando o arco está sobre o centro da poça, a DBCP aumenta. No modo STT, a corrente não muda, mas como o arco se torna mais longo, reduz-se a frequência de

curtos-circuitos. Essa frequência aumenta em caso contrário, ou seja, a poça está estável ou o arco está nas laterais da junta. O sistema de controle proposto pelos inventores monitora essa frequência e manda para fonte de energia um comando para diminuir a corrente quando a frequência é baixa (meio da poça) ou para aumentar quando a frequência dos curtos-circuitos torna-se alta (laterais da junta).

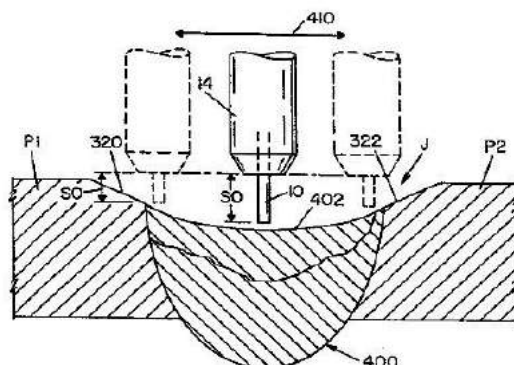


Figura 2.29 – Princípio do método de soldagem da patente *EP1036627 (B1)*, onde (320) e (322) são os chanfros da junta, (402) é a poça de fusão, (410) são os tecimentos pendulares da tocha, (P1) e (P2) são metais de base (tubos), (10) é o arame-eletrodo, (14) é a tocha, (SO) é o comprimento do eletrodo “stick-out” (STAVA; HSU; NICHOLSON, 2006)

A ideia desta patente é muito próxima da ideia deste trabalho, mas a diferença é que os processos MIG/MAG RSSP ou MIG/MAG APSTT utilizam dois tipos de modos operacionais de forma programada (e não por controle), ou seja, aumenta o calor imposto nas laterais e diminui no centro, teoricamente permitindo controlar a viscosidade do metal da poça de fusão. O autocontrole, como proposto por esta patente, pode não funcionar tão bem quando houver oscilação da poça, etc.

Andersson, Knipstrom e Malm (1979) em sua patente (*Method for tube welding – US 4142085 (A)*) desenvolveram um método diferenciado para soldagem orbital de tubos em junta de topo sem utilizar cobrejunta. Para tal aplicam um certo controle térmico do processo. Pela sua invenção, os tubos são posicionados na vertical e a soldagem (MIG/MAG) é feita na posição horizontal. Os tubos devem ter espessura de paredes acima de 12 mm. O esquema do princípio de funcionamento do método e a geometria do chanfro para tal estão mostrados na Figura 2.30. As dimensões dos chanfros em que se aplica sua patente são altura do nariz na faixa de 0,5 mm a 3,0 mm, ângulo de chanfro de até 40° e folga entre as faces não maior do que 1,5 mm. O diâmetro de eletrodo especificado é menor do que 1,0 mm e como gás de proteção utilizado uma mistura de Ar com CO₂ (0-40%).

O maior particularidade da invenção é que durante a soldagem é alterado alternadamente os parâmetros (no caso, a tensão do arco muda de um valor baixo para um valor alto, sendo a tensão baixa para produzir uma transferência das gotas por curto-circuito

e o ajuste de uma tensão alta para produzir uma transferência metálica “*spray*”). Ao mesmo tempo acontece um ajuste da velocidade de soldagem e da velocidade de alimentação.

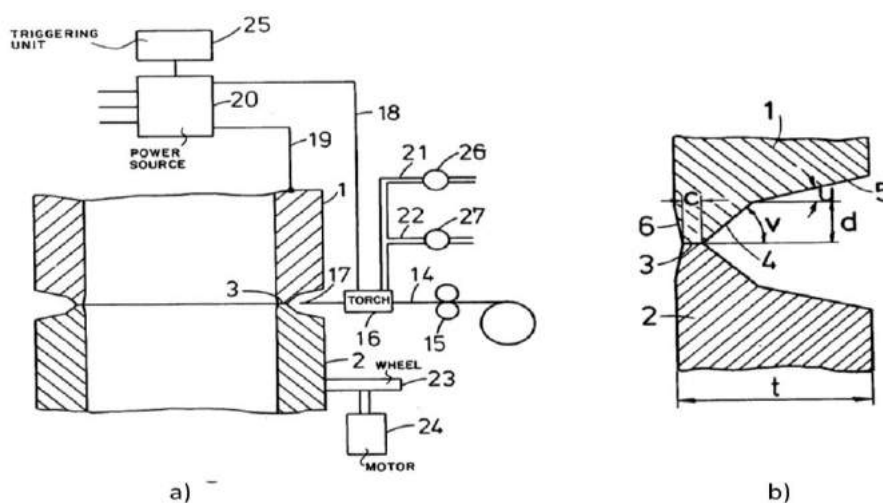


Figura 2.30 – Ilustrações do método da patente *US 4142085 (A)* e da geometria da junta aplicável com seus elementos principais, onde (1) e (2) são os tubos a serem soldados, (25) é a unidade de ativação ajustável (ANDERSSON; KNIPSTROM; MALM, 1979)

De acordo com o presente método, durante a realização do passe de raiz (Figura 2.31(a)) por um período de alternância de tensão pode ser realizado de 4 a 7 mm de comprimento do cordão de solda, e a parte de alta tensão consiste de 30-40% por um período de alternância. Por exemplo, duração de um período de alternância de tensão, enquanto executa se no caso de passe de raiz, é de pelo menos 0,8 s, e o tempo de alta tensão é aproximadamente igual a 0,3 s deste período. Os valores de tensão baixa é entre 22-26 V e a alta – é entre 36-40 V. Alternância de tensão entre um valor baixo (transferência por curto-circuito) e um valor alto (transferência “*spray*”) é numa com frequência de 0,5 a 2,0 Hz. Os passes de enchimento, posições 8 e 9 da Figura 2.31(b,c), realizados sobre o passe de raiz (posição 7 da Figura 2.31) com mesmos parâmetros que no passe de raiz. Os passes de acabamento (posições 10, 11, 12 e 13 da Figura 2.31(c)) são feitos sem alternância de tensão apenas com tensão baixa (transferência por curto-circuito) usando em gás de proteção CO₂ puro.

Os autores dizem que este método oferece uma técnica para soldagem o passe de raiz com alta qualidade. A penetração do passe de raiz é suficiente para formar um reforço, que praticamente no mesmo nível da superfície interna do tubo, não criando, assim, pontos de concentração de tensões e não diminuindo a área de seção transversal de tubo.

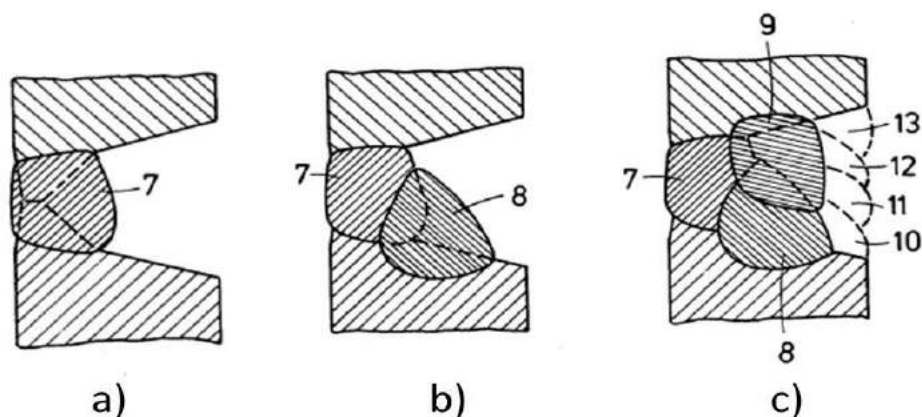


Figura 2.31 – Sequência de deposição dos passes de soldagem da patente *US 4142085 (A)*, onde (7) é o passe de raiz, (8) é o passe de enchimento, (9) é o passe de enchimento, (10), (11), (12) e (13) são os passes de acabamento (ANDERSSON; KNIPSTROM; MALM,1979)

A patente desta invenção apresenta alguns pontos com o método apresentado nesta dissertação, como, por exemplo, a mudança de transferência metálica ao longo de processo de soldagem. Só que, nessa patente, isso é conseguido através de mudança da tensão (comprimento do arco elétrico) com frequência pré-programada e sem tecimento. Desta forma, tentando aquecer e resfriar a poça de fusão. Na proposta da técnica MIG/MAG APSTT ou MIG/MAG RSSP, os modos operacionais, como a polaridade, valores de corrente de soldagem, transferências metálicas etc., são sincronizados com fase de tecimento.

Murayama e Sugitani (1991) inventaram e patentearam um método de soldagem orbital (*Method for one-side root pass welding of a pipe joint – US 5030812*) para soldagem de passes de raiz (e passes seguintes do lado externo dos tubos) em altas velocidades, como ilustrado pela Figura 2.32. Os autores usam a rotação do arco com alta frequência (10 a 150 Hz) para permitir um controle mais efetivo do método de seguimento de junta a partir do sensor de arco (*Through-the-arc-sensor*), mas neste caso ainda com cobrejuntas. Para maior sensibilidade do método, sincronizam os pulsos da corrente do MIG pulsado para acontecerem nas laterais.

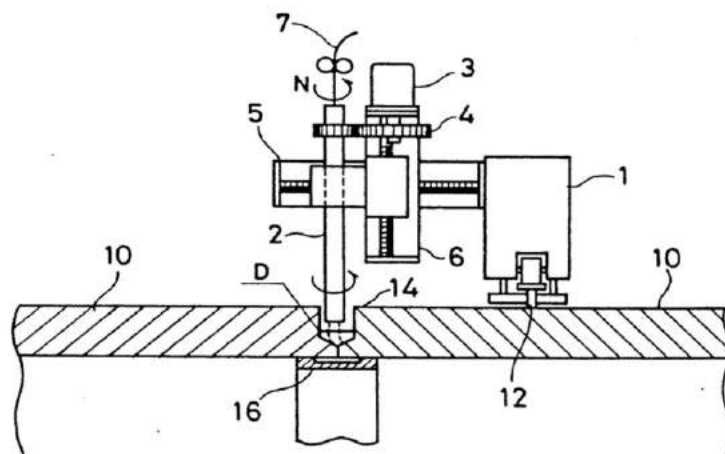


Figura 2.32 – Ilustração esquemática da máquina de soldagem automática utilizada na patente *US 5030812*: (1) – máquina de soldagem; (12) – trilho de guia, onde anda a máquina; (10) – superfícies dos tubos; (2) – tocha de soldagem fixada na máquina de soldagem; (3) – motor para rotação da tocha; (14) – chanfro; (7) – arame-eletrodo; (16) – cobrejunta, que não se funde (MURAYAMA; SUGITANI, 1991)

A patente apresenta uma ideia de alto nível de invenção, mas difere da proposta deste trabalho, tanto pelos objetivos como pela ideia. Apesar de ambos usarem de oscilação, na patente de Murayama e Sugitani (1991) o objetivo da oscilação é o seguimento de junta. Este seria um dos métodos a serem usados para reconhecer a amplitude da folga na proposta desta dissertação. Estes inventores também usam cobrejuntas, desnecessário na presente proposta para as técnicas MIG/MAG RSSP ou MIG/MAG APSTT.

Bracarense et al. (2006) em sua patente (*Robotic system for orbital welding of pipelines – WO 2006/037200 (A1)*) também variam os parâmetros de soldagem para controle da poça de fusão na criação de um sistema robótico para soldagem orbital de tubulações/dutos (passe de raiz, enchimento e acabamento). Mas esta mudança de parâmetros se dá pela posição orbital em relação ao tubo e através da oscilação transversal. Para isto, usa um inclinômetro, como ilustrado pela Figura 2.33. O sistema robótico permite a variação controlada dos parâmetros de soldagem (corrente de soldagem, tensão de soldagem, velocidade de soldagem, DBCP e ângulo da posição da tocha de soldagem) ao redor do tubo, que se realiza por meio de interpolação destes parâmetros sobre as regiões de transição (soldagem em posições – sobre cabeça, vertical e plana.

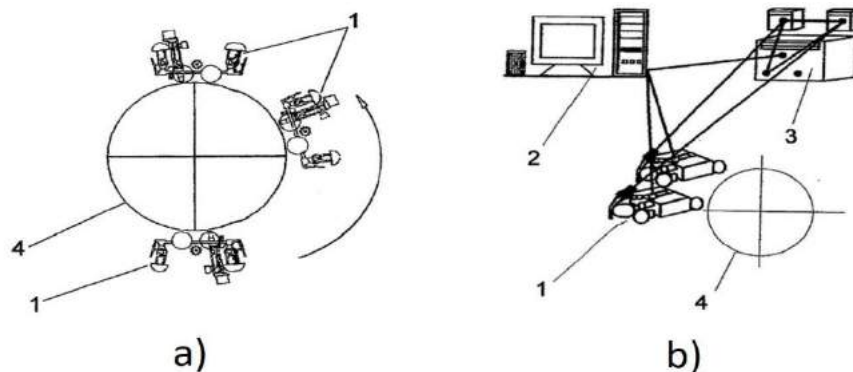


Figura 2.33 – Esquema básico do sistema robótico projetado para soldagem orbital de tubulações/dutos da patente *WO 2006/037200 (A1)*, onde a) o sistema está montado no tubo, b) os elementos (blocos) principais do sistema inventada, onde (1) é são manipuladores, (2) é o sistema de comando, (3) é a fonte com os alimentadores de arame-eletrodo e (4) é o tubo (BRACARENSE et al., 2006)

2.7 – Outros métodos aplicados em soldagem de tubulações/dutos

Diez et al. (2009) patentearam um método para soldagem de tubos com duplo arame (*Dual wire welding torch and method – US 7525067 (B2)*), onde apresentaram um modelo de uma tocha com esta finalidade (Figura 2.34(a)). Esta tocha tem um bico de contato especial que tem dois canais inclinados para guiar os dois arames-eletrodos de forma cruzada, um através de outro, mas sem contato (potenciais isolados), como mostra a Figura 2.34(b). O motivo da invenção foi a dificuldade em posicionar uma tocha comum na soldagem do passe de raiz para obter um cordão sem presença de falta de fusão nas laterais da junta e evitar risco de trincas, que pode promover um reparo caro e trabalhoso.

O presente método é uma tentativa de melhorar a eficiência e a confiabilidade de soldagem a arco elétrico através de uso duplo arame em única tocha. O método permite reduzir quantidades dos passes, graças a aumento de quantidade do metal de adição aumentando produtividade. Os autores não explicam o método de controle, falando que a soldagem pode ser executada automaticamente tanto quanto manualmente. Também reivindicam que ela pode ser utilizada com uma fonte de energia com controle pelo computador, que sincroniza os sinais de corrente para cada arame-eletrodo.

Em juntas de topo comuns, as bordas devem estar niveladas uma com outra. Os partes soldadas podem ser de painéis, vigas, tubos, etc. e como observado normalmente estão ligadas entre si com uma folga. Este método orienta os pontos dos arames se posicionam mais perto possível em fundo de chanfro, sob o qual está o cobrejunta. Preparação da junta pode ser feita sem chanfro, que economiza tempo de produção e diminui quantidade de metal depositado.

Quando utilizam tochas de duplo arame, os arcos elétricos podem gerar campos magnéticos que causam uma disposição dos arames a podem sair de centro desejado de junta. Enquanto, pela esta invenção, como mostra a Figura 2.34(c), os arames-eletrodos podem ser girados ao longo do processo de soldagem e inclinados no ângulo θ_3 máximo até 20 graus em relação arame reto (posição 231) e arame torto (posição 260) da Figura 2.35.

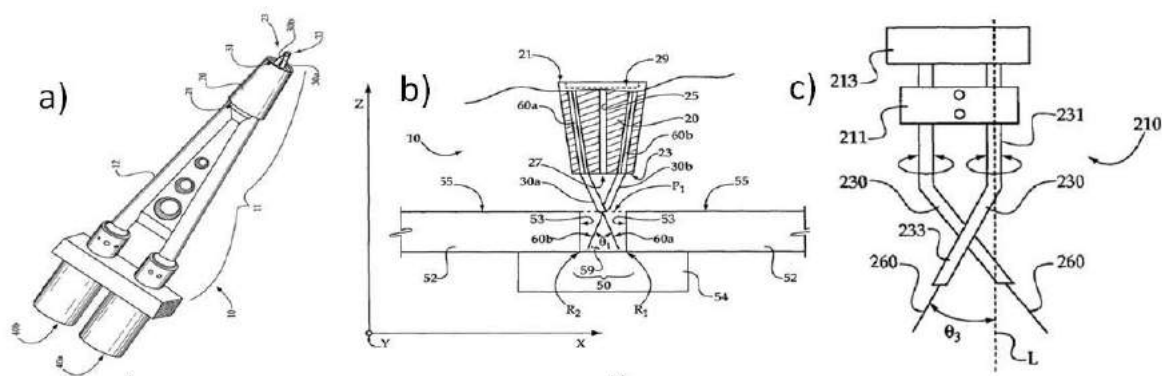


Figura 2.34 – Ilustrações da patente *US 7525067 (B2)*: a) tocha de soldagem duplo arame; b) princípio de funcionamento com seção transversal do bico de contato especial; c) princípio do sistema para girar e inclinar os arames-eletrodos com seus elementos principais, onde (211) é o grampo “clamp”, (213) é a tocha de soldagem (230) são guias dos arames-eletrodos, (260) são os arames-eletrodos e (θ_3) é o ângulo de inclinação dos arames-eletrodos (adaptado de DIEZ et al., 2009)

A presente descrição é para fins ilustrativos apenas, e não deve ser interpretado de forma a limitar a potencial da presente inovação, em qualquer maneira. Assim, os engenheiros da área podem inventar várias modificações dessa versão, sem sair do objetivo pretendido e do âmbito da presente revelação.

A patente apresenta maneira original para execução passe de raiz, parecida na proposta anterior com *US 6429405 (B2)*, usando esse método, de uma forma, é tirado pressão de arco de meia da junta, que foi uma das propostas do presente processo, mas em geral método é bem diferente. Também, esta invenção parecida com presente dissertação, porque a força do arco elétrico está concentrada nas laterais da junta, mas comparado com presente dissertação essa invenção não tenta controlar a poça de fusão, resfriando no meio e aquecendo nas laterais da junta, que bem difere presente trabalho.

2.8 – Considerações Finais

As patentes, apresentados neste capítulo, mostram os métodos, técnicas e processos para executar o passe de raiz (enchimento e acabamento) nos diferentes

processos de soldagem (MIG/MAG, TIG etc.) nas formas próximas e diferentes do que propõe a ideia deste trabalho. Mas como descrito no próximo capítulo (Capítulo III Metodologia, Equipamentos e Insumos) a ideia da técnica MIG/MAG RSSP pelo seu princípio de controlar a poça de fusão (viscosidade) pelo resfriamento da mesma é diferente. Não foi encontrado em nenhuma base de patentes onde foi realizada a busca algo do “mesmo tipo”. Por isso, a ideia da técnica deste trabalho vale uma patente.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA, EQUIPAMENTOS E INSUMOS

3.1 – Metodologia Fundamental

A metodologia a ser adotada para se atingir o objetivo do trabalho é baseada na seguinte premissa proposta pela equipe de trabalho envolvida neste projeto - *“Durante a soldagem de passes de raiz sem cobrejunta, a poça deve ser formada (fundindo as laterais do chanfro e interligando as mesmas através da região da folga) e solidificada sem escorrimento do metal fundido (perfuração). Ou seja, tem de se ter calor suficiente para formar um dado volume de poça, mas resfriando antes de escorrer.”*

Como se vê, existem duas demandas concorrentes, pois um volume de poça pequeno indica uma pequena fusão das laterais do chanfro, enquanto um maior volume leva a um tempo maior para solidificação. Um compromisso tem de ser achado. E teoricamente este compromisso se compõe pelo equilíbrio das forças atuantes na poça durante a soldagem esquematicamente representado na Figura 3.1, mostrando que a situação mais crítica é quando o arco está incidindo sobre a poça. Neste momento (Figura 3.1(A)), a poça se manterá sem escorrer quando se ter o equilíbrio estático mostrado pela Equação 3.1: Após a passagem do arco (Figura 3.1(B)), a poça ainda permanece líquida, mas não há mais ação das forças eletromagnéticas e devido ao momentum das gotas impingentes. A poça permanecerá no lugar se houver equilíbrio até que se solidifique.

$$F_y \geq F_p + F_{el} + F_m + F_g \quad (3.1)$$

onde F_p – força do jato de plasma devido à pressão dinâmica causada pelo campo magnético; F_{el} – força devida à pressão estática causada pelo campo eletromagnético; F_m – força devida ao momentum das gotas impingentes; F_y – força devida à tensão superficial; F_g – força da gravidade.

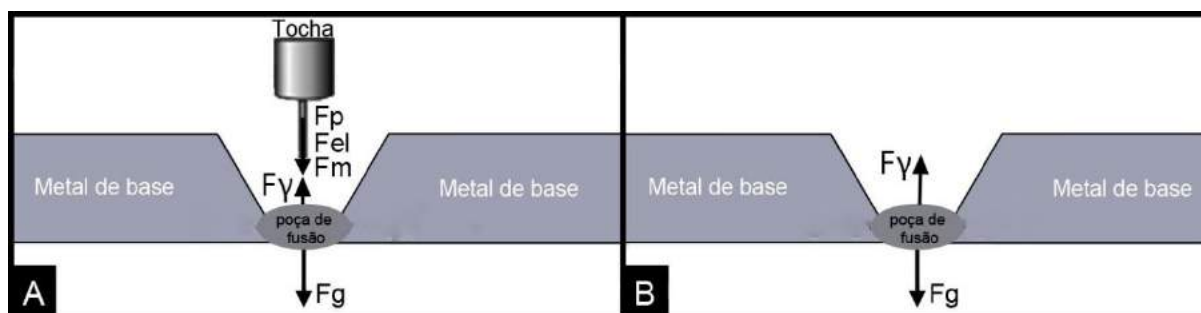


Figura 3.1 – (A) Formação inicial da poça de fusão, sob a ação do arco ($F_\gamma = F_p + F_{el} + F_m + F_g$); (B) Finalização da formação da poça, depois que o arco tenha passado ($F_\gamma = F_g$), antes da solidificação: onde F_p = força do jato de plasma devido à pressão dinâmica causada pelo campo magnético; F_{el} = força devida à pressão estática causada pelo campo eletromagnético; F_m = força devida ao momentum das gotas impingentes; F_γ = força devida à tensão superficial; F_g = força da gravidade

Porém, deve-se considerar também neste modelo o efeito dinâmico, ou seja, o escorrimento da poça para caracterizar a perfuração não se dá instantaneamente no caso de vencido o equilíbrio estático. Assim, a viscosidade do material da poça passa a ser um fator de extrema importância. Na verdade, o que se precisa é que a viscosidade da poça seja aumentada, para que mesmo havendo um volume grande de poça (desequilíbrio em favor da gota escoar-se), haja tempo da mesma se solidificar sem “escorrer”.

Assim, o que se procura, por hipótese, é trabalhar um pouco acima do equilíbrio, mas controlando a viscosidade. Mas a viscosidade é controlada pela temperatura do metal líquido na poça de fusão. Portanto, para controlar ao mesmo tempo a viscosidade e a necessidade de calor para fundir um volume, a solução seria aquecer e resfriar periodicamente a poça, permitindo a fusão (nas laterais da junta) e o resfriamento (no meio da junta).

Desta forma, a proposta metodológica para este trabalho é controlar a poça de fusão pela distribuição de calor ao longo da junta durante a soldagem, fazendo com que mais calor seja aportado nas laterais da junta e menos calor e/ou menos pressão do arco/gotas em transferência esteja atuando quando a tocha estiver transitando entre as laterais da poça. E isto seria possível pela combinação do controle da trajetória da tocha com o controle da modulação da corrente de soldagem de forma otimizada.

Para tentar chegar a esta condição de controle, neste trabalho se propõe uma sincronização da corrente de soldagem com a posição da tocha na técnica *Switch-back* (comutação entre avanço e retorno), na tentativa de se resfriar o centro da junta e adicionar calor nas laterais da mesma, como mostra a Figura 3.2. No caso, nas laterais a soldagem funcionará com o eletrodo na polaridade CC+, que a princípio pode conferir maior

penetração e melhor estabilidade do arco. Já quando a tocha estiver no meio da junta (sobre a folga), a polaridade da soldagem passará para o eletrodo em CC-, possibilitando diminuir o calor sobre a poça no meio da junta (mesmo às custas de menor estabilidade de arco), aumentando assim a chance de obter cordões sem perfurações.

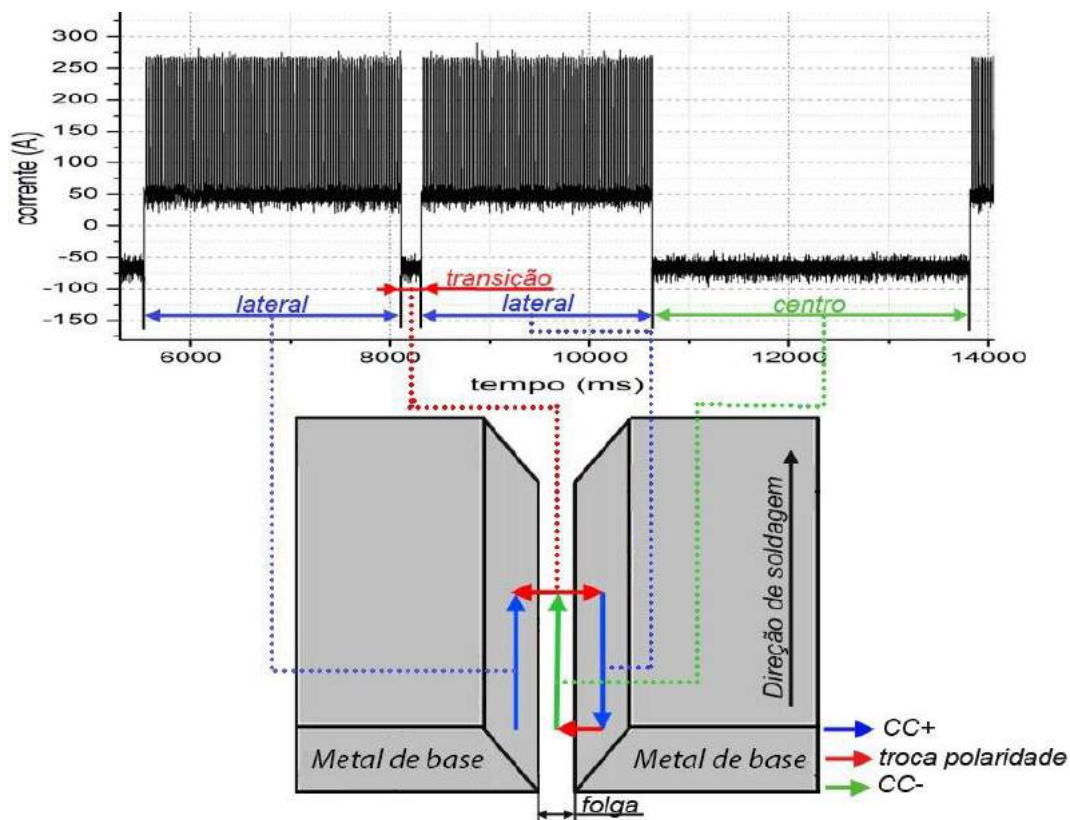


Figura 3.2 – Esquema da sincronização do processo MIG/MAG com reversão sincronizada de sentido da tocha (*Switch-back*) e polaridade (CC+ nas laterais e CC- no centro da junta)

Para possibilitar essa metodologia de execução do passe de raiz de forma automatizada, a seguir são descritos os equipamentos, insumos e outros recursos necessários.

3.2 – Bancada experimental

Os principais componentes da bancada utilizada foram:

- Fonte especial de soldagem, que permite trocar os parâmetros (modo de programa) de forma sequencial e cíclica através dos sinais digitais;
- Mesa de coordenadas ortogonais X-Y, que permite através de programação realizar a trajetória de soldagem (*Switch-back*), devidamente calibrada quando aos movimentos de translação.

- Um sistema de fixação das placas de teste, que permite manter as peças no local de forma alinhada com o movimento da tocha;
- Sistema dos sensores de posição da tocha em relação à junta, para sincronizar os movimentos da tocha com o modo da corrente de soldagem programada na fonte;
- Interface para sincronizar os movimentos da tocha com os parâmetros através do comando da fonte de soldagem;
- Sistema de aquisição dos sinais elétricos (parâmetros de soldagem e controle);
- Tocha MIG/MAG automática (reta);
- Detector (sensor de luminosidade) de transferência metálica “*P-GMAW Precise Tuner*”, para verificar e controlar a transferência metálica no modo pulsado.

3.2.1 – Fonte de soldagem e alimentador do arame-eletrodo

Para realizar este trabalho, foi necessário uma fonte de energia especial capaz de mudar a polaridade (programa) de operação durante o processo de soldagem. Assim, foi utilizada uma fonte de soldagem DIGIPlus A7 (Figura 3.3), que permite programar livremente diferentes formatos de ondas e modos, dentre eles o convencional para MIG/MAG Pulsado na polaridade CC+ e corrente contínua na polaridade CC-. De acordo com o fabricante (IMC, 2012), este equipamento possui um avançado processador ARM de 32 bits, que permite operar com diversas modalidades de soldagem com elevado desempenho no controle do arco e da transferência metálica, com capacidade de corrente de até 450 A. A Tabela 3.1 traz as principais características técnicas deste equipamento.



Figura 3.3 – Fonte de soldagem DIGIPlus A7 da IMC Soldagem (IMC, 2012)

Tabela 3.1 – Características técnicas de fonte de soldagem DIGIPlus A7 (IMC, 2012)

Capacidade de Corrente, A	450
Tensão de alimentação trifásica, V	220/380/440
Tensão em vazio (configurável de fábrica), V	50/68/85
Corrente a 100 % de fator de carga, A	280
Potência nominal, kVA	10
Faixa de corrente, A	5- 450
Corrente nominal por fase (220/380/440), A	26/15/13
Ripple de corrente, A	8
Fator de Potência	0,94

Essa fonte contém um modo de controle externo (VIA I/O) que permite que o usuário pré-programe até seis diferentes configurações (modos de soldagem) para o processo MIG/MAG. Durante o processo, um sinal remoto pode alterar entre essas configurações através de três bits de controle (MANUAL DE INSTRUÇÕES DIGIPlus A7, 2012), conforme a Tabela 3.2. Assim, essa fonte pode ser programada para alternar entre MIG/MAG Pulsado na polaridade CC+ e corrente contínua na polaridade CC-, como requerido.

Tabela 3.2 – Relação código binário em função do programa

Programa	Bit 2	Bit 1	Bit 0
P1	0	0	0
P2	0	0	1
P3	0	1	0
P4	0	1	1
P5	1	0	0
P6	1	0	1

Foi utilizado um alimentador de arame STA-20 do mesmo fabricante (Figura 3.4). O sistema tracionador de arame STA-20 possibilita a alimentação de arame-eletrodo bobinado de diversos tipos, com velocidade regulada pelo usuário numa faixa de 1,00 a 20,00 m/min. Uma de suas principais características é a possibilidade de alimentação de arame com velocidade pulsada. Isto permite a realização de soldas com corrente pulsada, onde as velocidades de alimentação na base e no pulso de corrente podem ser selecionadas de maneira independente. Além disso, para cada modo de soldagem programado, é possível escolher uma certa velocidade de alimentação.



Figura 3.4 – Alimentador de arame-eletrodo STA-20 do IMC Soldagem

Antes de utilizar o alimentador de arame-eletrodo, foi realizado uma calibração de sua velocidade de alimentação. Para isto, foi utilizado uma régua especial mostrada na Figura 3.5. Ao entrar por um tubo de pequeno diâmetro (1) montado no suporte (2), o arame-eletrodo fecha uma das duas chaves de contato (4) enviando assim um sinal pelo fio (3) que chega ao cronômetro, disparando a tomada de tempo. Ao sair na outra extremidade do tubo, o arame-eletrodo fecha a outra chave de contato, finalizando assim a tomada de tempo. Pela distância entre as chaves de contato (4), constante e igual a 787 mm, e o tempo cronometrado, é possível calcular a velocidade de alimentação de arame real e comparar esta com a programada (eliminado o erro de aceleração e desaceleração do motos do alimentador). A Tabela 3.3 mostra os resultados da calibração da velocidade de alimentação.

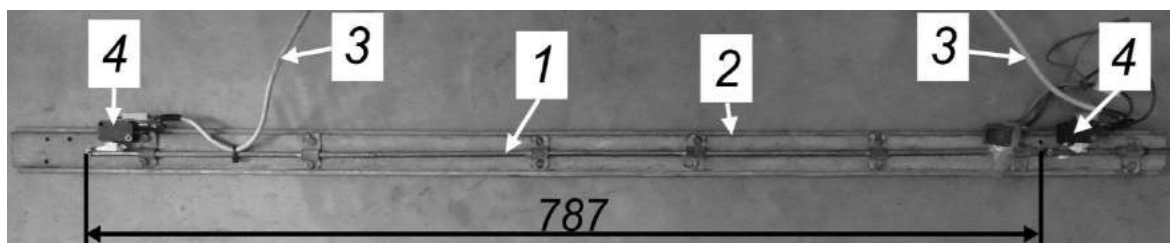
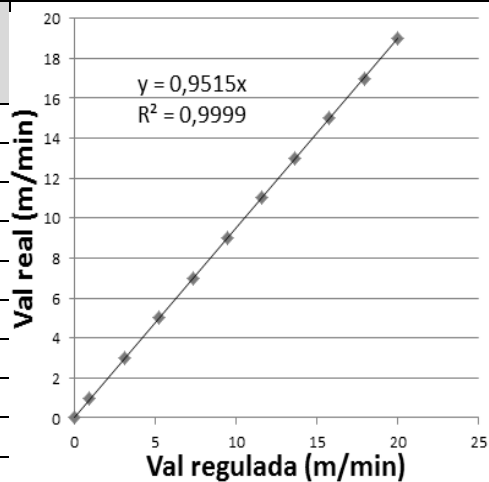


Figura 3.5 – Régua especial com elementos principais para calibração da velocidade de alimentação de arame

Tabela 3.3 – Calibração da velocidade de alimentação de arame-eletrodo no alimentador STA-20

Testes	Tempo (s)	Espaço (m)	Valim regulada (m/min)	Valim real (m/min)
1	52,91	0,787	1	0,89
2	15,29	0,787	3	3,09
3	9,05	0,787	5	5,22
4	6,44	0,787	7	7,33
5	5,00	0,787	9	9,44
6	4,07	0,787	11	11,59
7	3,46	0,787	13	13,65
8	3,00	0,787	15	15,74
9	2,64	0,787	17	17,91
10	2,36	0,787	19	19,98



3.2.2 – A mesa de coordenadas

Para realizar a trajetória típica da técnica *Switch-back*, foi utilizada uma mesa de coordenadas X-Y-R programável, que permite programar e realizar os percursos de avanços e recuos, necessários para a técnica *Switch-back*, e oscilação convencional (tecimento transversais pendulares e lineares) (Figura 3.6).

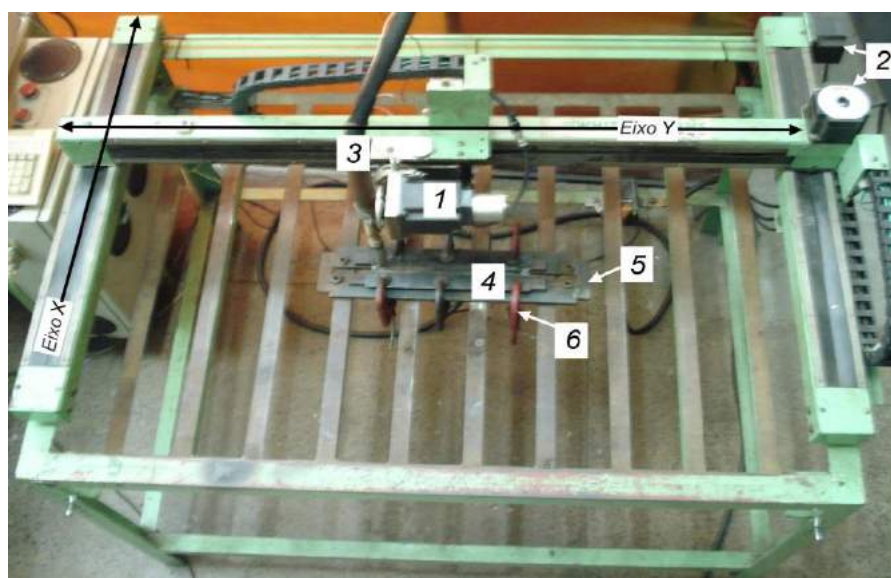


Figura 3.6 – A mesa de coordenada do tipo X-Y-R utilizada para a realização da trajetória típica *Switch-back*, onde (1) é o motor que fornece o tecimento transversal pendular (R) da tocha, (2) os motores que fornecem os movimentos lineares (X-Y), (3) a tocha automatizada (reta) de soldagem, (4) a chapa de teste, (5) o suporte especial para fixação das placas de teste e (6) um dos seis grampos para fixar a placa de teste no suporte

Essa mesa tem as seguintes especificações:

- Comprimento do eixo Y = 1000 mm;
- Comprimento do eixo X = 573 mm;
- Velocidade de soldagem (V_s) = 0,5 mm/s a 80 mm/s;
- Resolução na velocidade de soldagem = 0,01 mm/s;

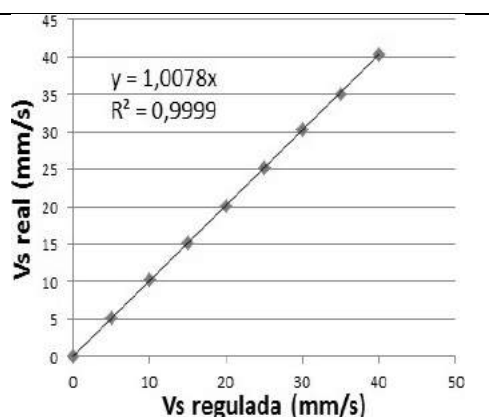
Antes de se usar a mesa, foi calibrada a sua velocidade nos eixo X e Y. Para o eixo Y, sensores magnéticos e uma interface com um cronômetro digital foram utilizados para adquirir os tempos de deslocamento da tocha dentro de uma mesma distância de 700 mm, como indicado na Figura 3.7. Com a definição das distâncias percorridas pela tocha e dos tempos obtidos, foram calculadas as velocidades em cada condição (Velocidade de soldagem real). Os resultados da Tabela 3.4 mostram a confiabilidade do uso deste equipamento quanto à velocidade no eixo Y durante as soldagens.



Figura 3.7 – Ilustração de calibração de velocidade na mesa de coordenada para eixo Y (mesmo princípio para eixo X)

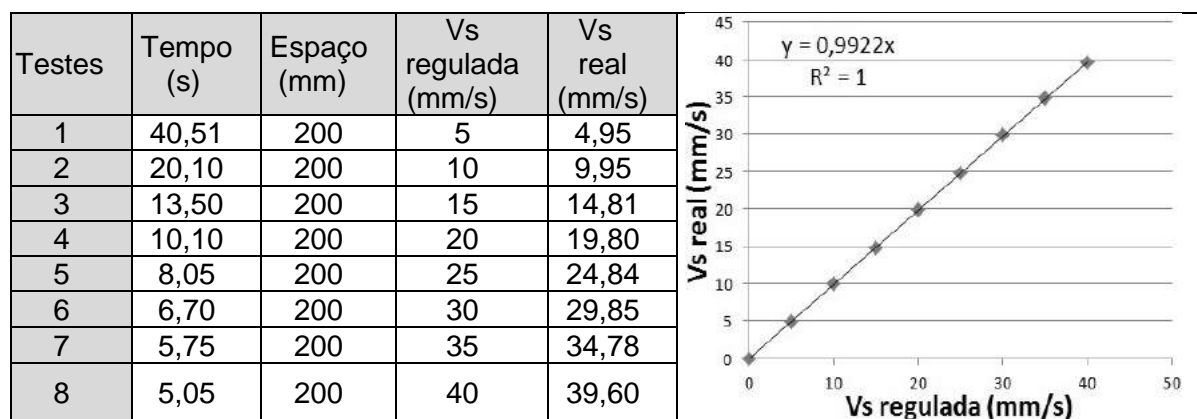
Tabela 3.4 – Verificação da velocidade da tocha no eixo Y

Testes	Tempo (s)	Espaço (mm)	V_s regulada (mm/s)	V_s real (mm/s)
1	137,17	700	5	5,1
2	68,50	700	10	10,22
3	46,07	700	15	15,19
4	34,66	700	20	20,2
5	27,78	700	25	25,2
6	23,06	700	30	30,36
7	19,94	700	35	35,11
8	17,38	700	40	40,28



Para o eixo X foi utilizado o mesmo procedimento do eixo Y, mas com a distância de deslocamento de 200 mm em função da dimensão reduzida da mesa neste eixo. Os resultados da Tabela 3.5 mostram a confiabilidade do uso deste equipamento quanto à velocidade no eixo X durante as soldagens.

Tabela 3.5 – Verificação da velocidade da tocha no eixo X



3.2.3 – Fixação das placas de teste

A Figura 3.8 ilustra como foi feita a fixação das chapas de teste, já com as juntas preparadas para serem soldadas. Esta fixação foi elaborada de forma a garantir um bom travamento, impedindo que as chapas se deformassem ao longo do processo de soldagem, o que não é difícil de ocorrer dado seu tamanho considerável (400 mm). O suporte de fixação das juntas contou com reguladores de nível (Item 1 da Figura 3.8) para garantir o mesmo nível das placas de testes durante de soldagem ao longo de todo o comprimento. Também neste suporte foram feitos os reguladores da distância entre barras (posição 6 da Figura 3.8) de cobre, utilizadas debaixo das placas de teste para absorver a maior quantidade possível de calor difundido pela chapa durante os testes, mas sem afetar o calor gerado na zona fundida (simulando chapas de maiores larguras).

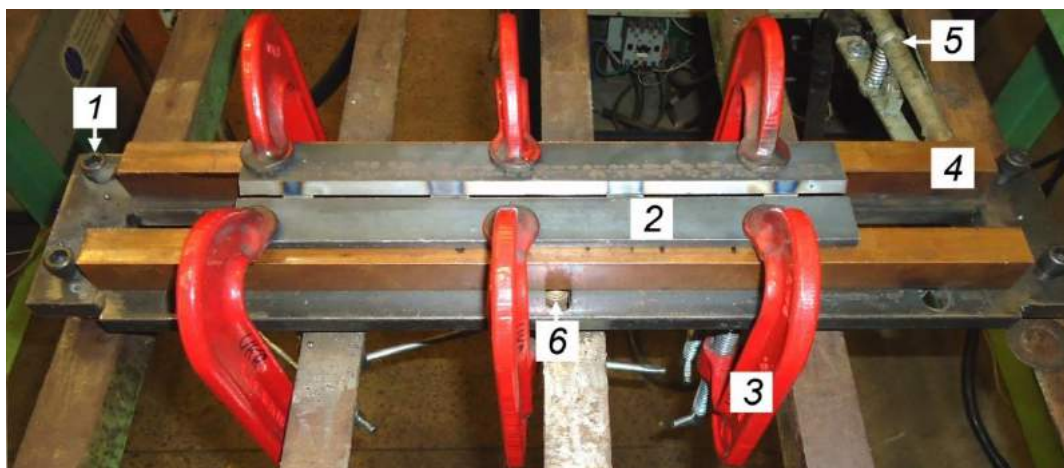


Figura 3.8 – Suporte para fixação das chapas, onde (1) reguladores de nível, (2) placa de teste, (3) grampos (sargentos), (4) barras de cobre maciças (seção transversal de 22 x 22 mm), (5) conector do cabo terra e (6) reguladores de distância entre barras de cobre

3.2.4 – Sistema de aquisição de sinais elétricos (dados)

A principal função desse sistema foi a de monitorar a tensão, corrente e movimento da tocha, de forma sincronizada, permitindo verificar se as correntes CC+ e CC- estão em fase com a lateral e centro da junta. A Figura 3.16 (B) mostra o computador com softwares (Labview e OriginPro), que respondem pela aquisição e visualização de dados dos sinais elétricos.

Os monitoramentos da tensão, corrente e do sinal do tecimento da tocha foram realizados de forma sincronizada utilizando-se uma placa de aquisição da *National Instruments*®, modelo NI USB-6009, ilustrada na Figura 3.9. Sua conexão com o computador é feita via USB (*Universal Serial Bus*). Um programa desenvolvido em linguagem *LabVIEW*® permite a interface gráfica com o usuário, apresentando os sinais adquiridos e com a opção de salvá-los em formato texto para posterior análise e tratamento. O tempo desejado para a aquisição é introduzido em segundos. Este sistema de aquisição (juntos placa e programa) permite verificar se o modo de soldagem programado está em fase com a lateral ou centro da junta.



Figura 3.9 – Placa de aquisição da *National Instruments*® modelo NI USB-6009

3.2.5 – Comando da fonte através de sensoriamento para sincronização entre movimento (posição) da tocha e modo de soldagem

O Grupo Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem (Laprosolda) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) desenvolveu uma interface denominada *CONPARTE*, para mudar os parâmetros de soldagem na fonte DIGIPlus A7 durante de soldagem, dependendo da posição da tocha. A Figura 3.10 mostra os elementos principais deste sistema de controle, Cada um dos três LED's (Item 7 da figura) corresponde a um tipo de sinal que chega na unidade central de controle, a saber:

- a) se o sensor transmissivo óptico P2 (P4) que responde pela posição da tocha e modo de soldagem na lateral da junta estiver fechado, o LED P2 (P4) é ligado;
- b) se nenhum dos dois sensores estão fechados, o LED P3 é ligado (indicando o modo de soldagem no meio da junta).

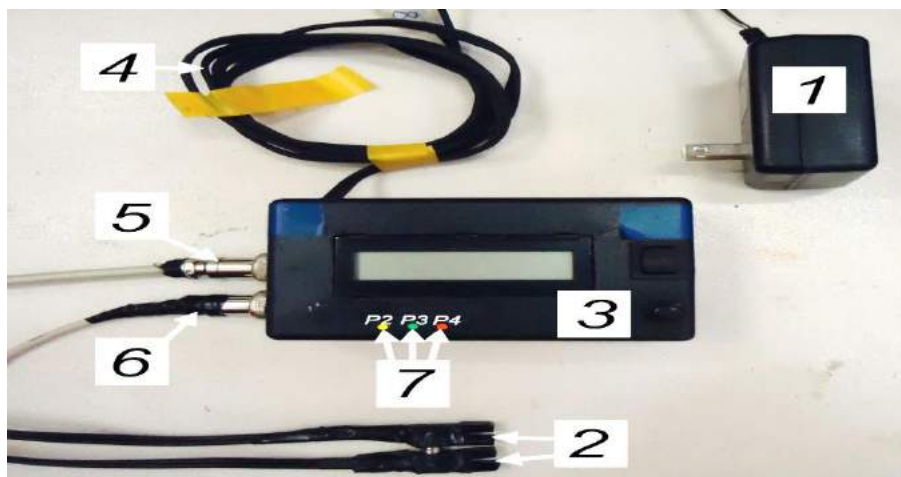


Figura 3.10 – Elementos principais do sistema de monitoramento (interface) da tocha, sendo (1) alimentador da unidade central de controle (caixa de controle), (2) dois sensores (P2 e P4) transmissivos ópticos, modelo TCST1103, que enviam os sinais para a (3) caixa ou unidade central de controle pelos (4) fios de saída dos sinais dos sensores para aquisição de dados, fio de entrada (5) dos sinais dos sensores na unidade central de controle (ACEL), fio com saída (6) para fonte de soldagem e três LED's (7) para monitorar os sensores transmissivos ópticos e os programas de soldagem

O envio do sinal para a fonte ainda é condicionado por um botão no painel de controle. No modo de “Monitoramento” apenas há a indicação das regiões através dos LED's, sem o envio dos sinais para a fonte e, no modo “Envia Programa” ambos os LED's e sinais de controle são atualizados em tempo real. Padronizou-se, também que o programa (pré-programado) da região central é o programa P3 e os programas das regiões laterais são os programas P2 e P4.

O sensor do tipo transmissivo óptico modelo TCST1103 consiste em um par emissor-receptor de luz, infravermelha, que está disposto frente a frente em uma cápsula própria, como indicado na Figura 3.11. A Figura 3.11 (B) mostra o esquema elétrico com elementos básicos do sensor, onde o emissor (diodo) emite luz infravermelha para o receptor (fototransistor). A distância entre o emissor e o receptor é igual a 0,3” (7,6 mm).

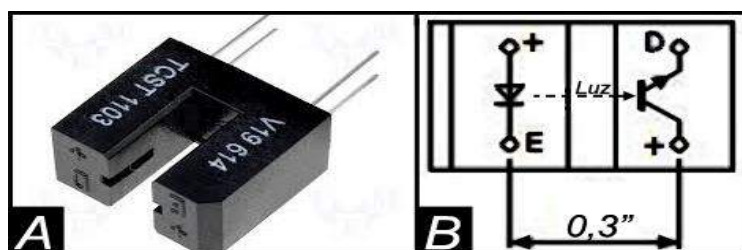


Figura 3.11 – Sensor transmissivo óptico TCST1103: A) vista do sensor; B) esquema elétrico do sensor com emissor (E) e receptor (D)

A Figura 3.12 mostra a montagem dos sensores do tipo transmissivo óptico para monitorar deslocamento do eixo X da mesa de coordenadas. Para isso, foi feito um suporte especial, o qual foi preso na mesa por dois grampos. Para proteger os sensores contra a radiação (luz) do arco foi colocada uma tampa de proteção. Uma lâmina construída feita de folha de flandres foi colocada de forma conveniente para abrir/fechar os sensores de acordo com movimento da mesa de coordenadas no eixo X.

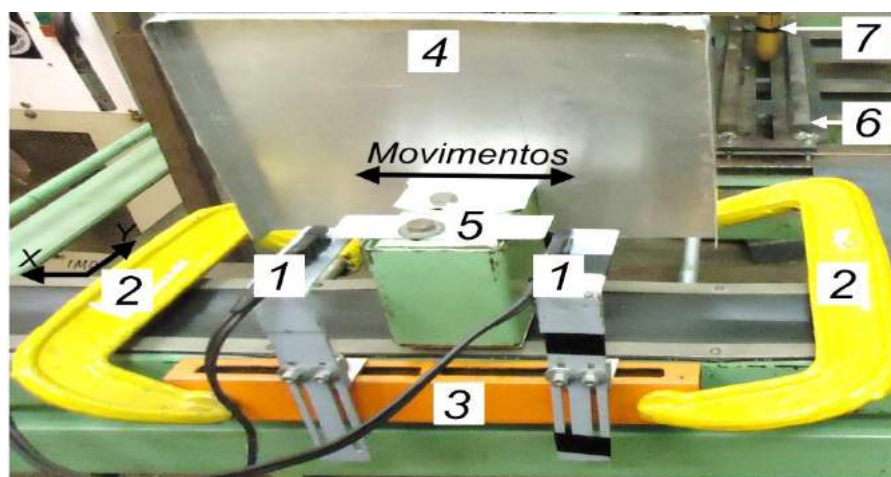


Figura 3.12 – Montagem dos sensores na mesa de coordenadas, sendo (1) sensores do tipo transmissivo ótico, (2) grampos para fixação dos sensores, (3) suporte com guia de alinhamento para os sensores, (4) tampa de proteção para evitar a luz do arco, (5) lâmina de acionamento do sensor, (6) suporte para fixar as placas de teste e (7) tocha de soldagem automatizada.

O princípio de funcionamento deste sistema é mostrado na Figura 3.13. Quando a lâmina interrompe o fluxo de luz saindo do emissor e este não chega no receptor (transistor fotossensível do tipo NPN, normal “fechado”), este está ativado e envia um sinal com nível alto para a sua saída. A sensibilidade deste tipo de sensor depende principalmente do tamanho do feixe de luz que é transmitido e recebido entre seus extremos. Ou seja, se o feixe de luz é bastante estreito, um objeto como uma agulha pode resultar em um nível alto. Neste trabalho foram utilizados dois sensores do tipo transmissivo óptico (sensores P2 e P4 da Figura 3.13). Se a lâmina interrompe o fluxo de luz, o sistema (unidade central de controle) envia os sinais para fonte de soldagem que, por sua vez, passa a operar no modo programado previamente. Se a lâmina não bloqueia o fluxo de luz, o sistema envia um sinal de controle para a fonte passar a operar no outro modo de soldagem programado. Esse sistema é suficientemente adequado para realizar a Etapa 3.1 “Metodologia fundamental”.



Figura 3.13 – Princípio de funcionamento do sistema de monitoramento da tocha e comando da fonte de soldagem

A Figura 3.14 apresenta a vista principal da bancada experimental que foi utilizada neste trabalho com indicação de seus elementos principais.

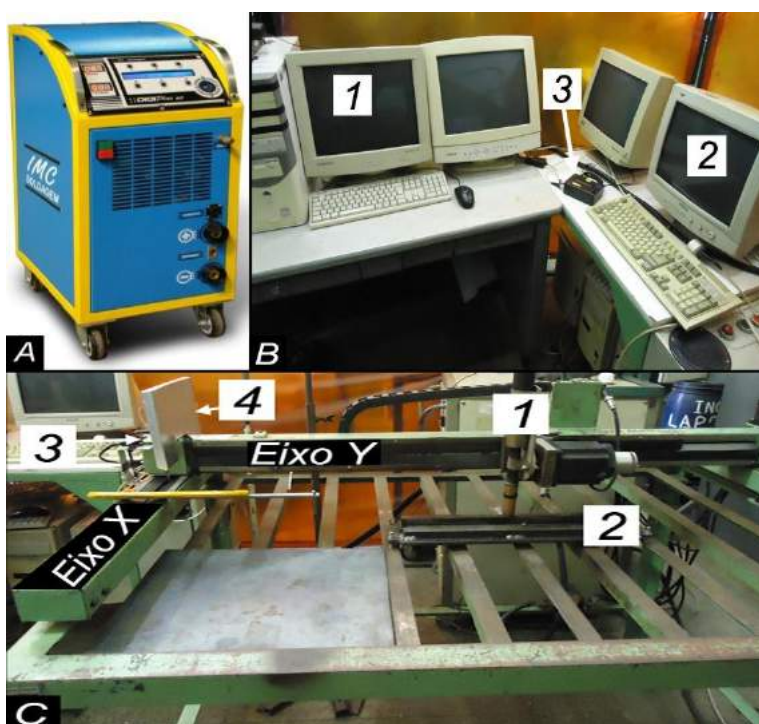


Figura 3.14 – Bancada experimental: A) fonte de soldagem; B) conjunto de microprocessadores, subdividido em (1) sistema de aquisição dos sinais elétricos, (2) sistema computadorizado para comando e programação do movimento da mesa, (3) caixa de controle dos sensores; C) mesa de coordenadas, onde (1) é a tocha de soldagem, (2) é o fixador para placa de teste, (3) é o sistema dos sensores e (4) é a proteção dos sensores contra a luz do arco

3.2.6 – Detector de transferência metálica “P-GMAW Precise Tuner”

O princípio de funcionamento do detector de transferência metálica “P-GMAW Precise Tuner” (Figura 3.15) é baseado no monitoramento da luminosidade do arco. O detector trabalha com o sinal da luminosidade do arco para verificar a transferência metálica durante de soldagem. Como sensor de luz é usado um fotodiodo de silício. A resposta espectral do fotodiodo utilizado abrange desde a faixa de luz visível a regiões do infravermelho, 0,8 a 0,9 nm de comprimento de onda (a linearidade e a dinâmica são excelentes) (SCOTTI; PONOMAREV 2008, p.172).

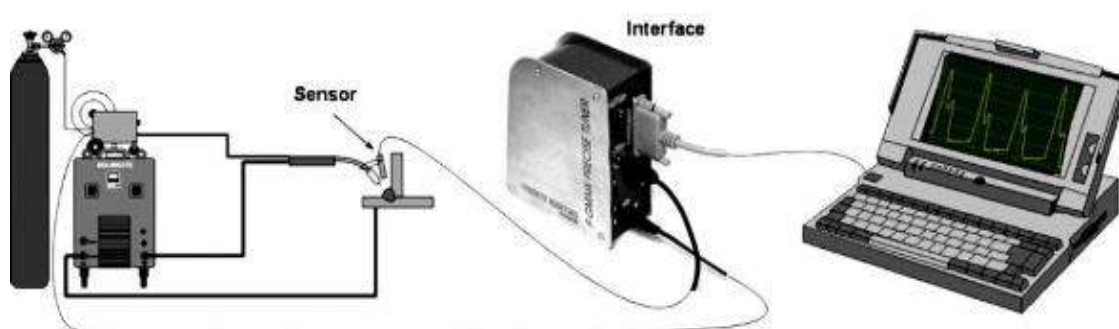


Figura 3.15 – Instrumentação do sistema de monitoramento e/ou controle de transferência pulsada no processo de soldagem MIG/MIG Pulsada com base na análise do sinal da luminosidade do arco (MIRANDA; SCOTTI; FERRARESI, 2007)

O fluxo luminoso emitido pelo arco de soldagem pode ser alterado de diversas maneiras durante a soldagem, dentre as quais se pode citar a alteração da corrente de soldagem e do comprimento do arco. A alteração da corrente de soldagem, independente de ser proposital ou não, pode ser facilmente detectada pelos sistemas adequados de aquisição dos sinais elétricos. Contudo, a modificação do comprimento do arco nem sempre pode ser percebida em condições de soldagem com transferência metálica por meio de sinais elétricos do arco, embora sendo acompanhada pelas suas mudanças de tensão (dependendo das condições de soldagem, a relação entre a tensão de arco (U_a) e o comprimento de arco (L_a) pode ser tanto diretamente proporcional como inversamente proporcional). Como regra geral, quanto maiores a corrente e o comprimento do arco, maior será o fluxo luminoso. É neste princípio que se baseia a utilização de sinais de luminosidade para detecção de transferência metálica na corrente pulsada, pois, em maior ou menor escala, a transferência metálica produz variações no fluxo luminoso gerado pelo arco.

A Figura 3.16 apresenta o sensor de luminosidade de transferência metálica montada numa tocha. Mas este sensor de luminosidade foi usado neste trabalho para

verificar o momento de transferência da gota durante a pulsação, se o pulso ou na base, se de forma individual ou sequencial, ou seja, para saber se os parâmetros de corrente pulsada são adequados para obter uma condição de uma gota por pulso (UGPP). Quando a transferência não se apresenta durante o pulso, ou quando ocorre mais de uma gota por pulso, o perfil do sinal luminoso é diferenciado, conforme ilustra a Figura 3.17. Esta diferença permite ao operador regular seu equipamento para fornecer uma gota por pulso através da imagem no visor do computador, como ilustrado pela Figura 3.18.

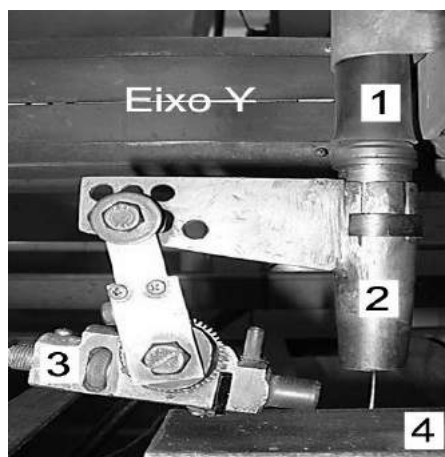


Figura 3.16 – Sistema utilizado nos testes para verificar a transferência metálica, onde (1) é a tocha MIG/MAG automática (reta), (2) é o bocal especial da tocha com suporte para o sensor de luminosidade, (3) é o sensor de luminosidade e (4) é a placa de teste

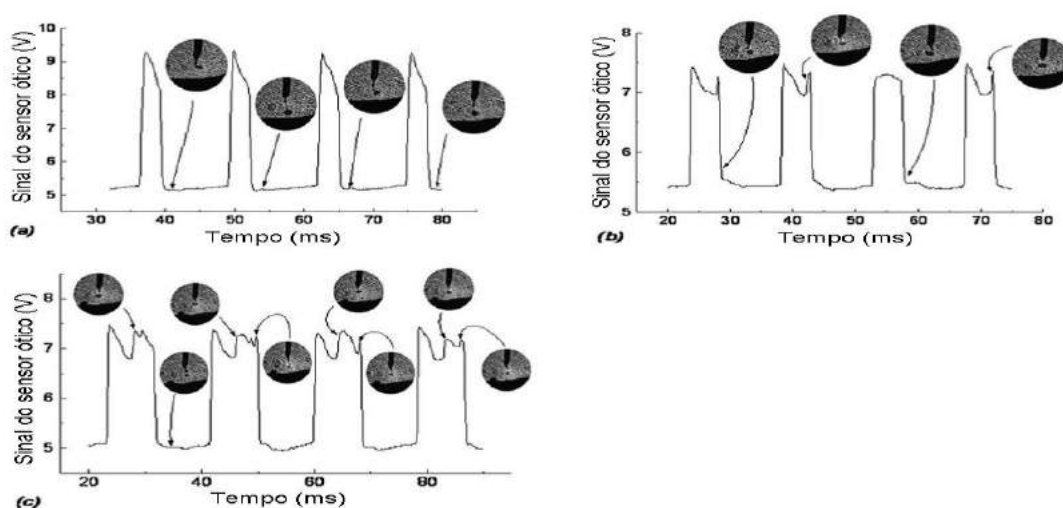


Figura 3.17 – Ilustração do sinal do sensor ótico para transferência de: (a) – “uma gota por pulso” – destacamento no início da base; (b) – “uma gota por pulso” – destacamento no final do pulso para o início da base; (c) – “duas gotas por pulso” – destacamento de uma gota no meio do pulso e uma no final do pulso para o início da base (MIRANDA; SCOTTI; FERRARESI, 2007)

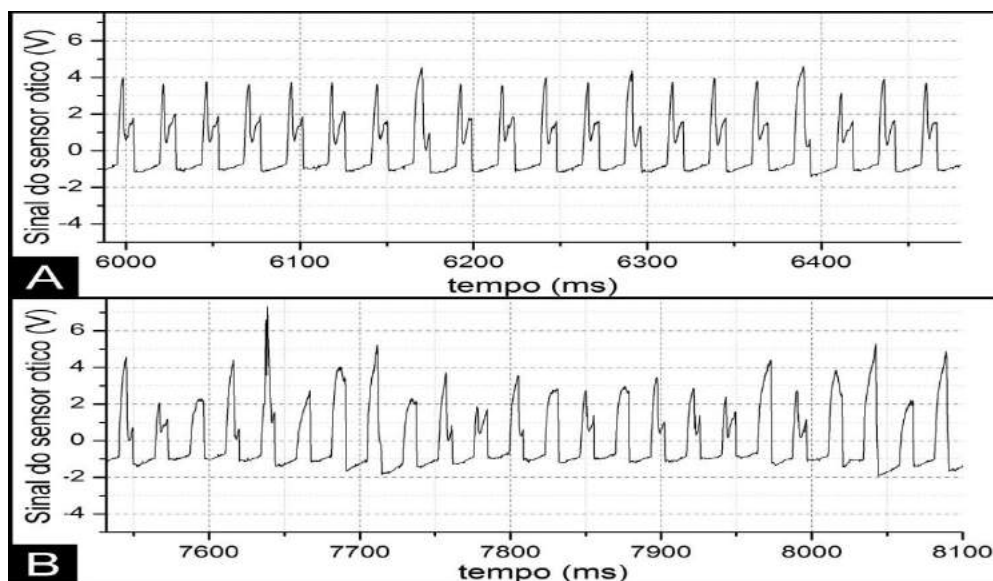


Figura 3.18 – Ilustração das oscilogramas dos sinais do sensor óptico: A) oscilograma com UGPP no final de cada pulso; B) oscilograma sem UGPP em cada pulso

3.3 – Trajetória de soldagem *Switch-back* do tipo lateral-lateral-centro

A Figura 3.19 mostra a trajetória do *Switch-back* típica que foi usada neste trabalho. O primeiro movimento de avanço (passe L1) se dá na lateral. Depois acontece o passe L2, que é um passe de transição, seguido por um movimento de recuo na outra lateral, passe L3, e complementado por outro movimento de avanço no centro, o passe L5. Os passes L4 e L6 são movimentos transversais para completar o ciclo da trajetória. No caso, nas laterais se usa a polaridade CC+ (parte da trajetória em amarelo da Figura 3.19), enquanto no centro se usa a polaridade CC- (parte da trajetória em verde da Figura 3.19). Dada a sequência de movimentos adotada, de agora em diante falar-se-á neste trabalho em movimento da tocha lateral-lateral-centro da técnica *Switch-back*.

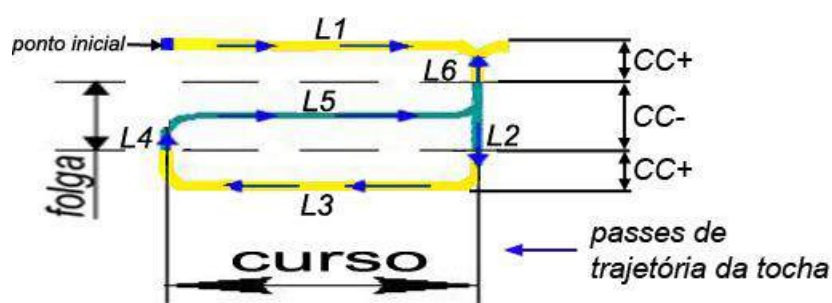


Figura 3.19 – Esquema do movimento da tocha lateral-lateral-centro da técnica *Switch-back* sincronizado com a polaridade do arame-eletrodo (amarelo indica polaridade CC+ e verde indica polaridade CC-)

A Figura 3.20 ilustra a aplicação da trajetória da técnica *Switch-back* lateral-lateral-centro da Figura 3.19 em chapas com chanfro. A possível vantagem dessa trajetória do *Switch-back* do tipo lateral-lateral-centro sincronizada à mudança de polaridade seria usar nos dois primeiros passes (passes L1 e L3 da Figura 3.21) um passe “mais quente” para garantir penetração nas laterais dos chanfros e usar um terceiro passe (passe L5 da Figura 3.21) em CC- (menos quente) para fechar a folga restante sem risco de perfuração.

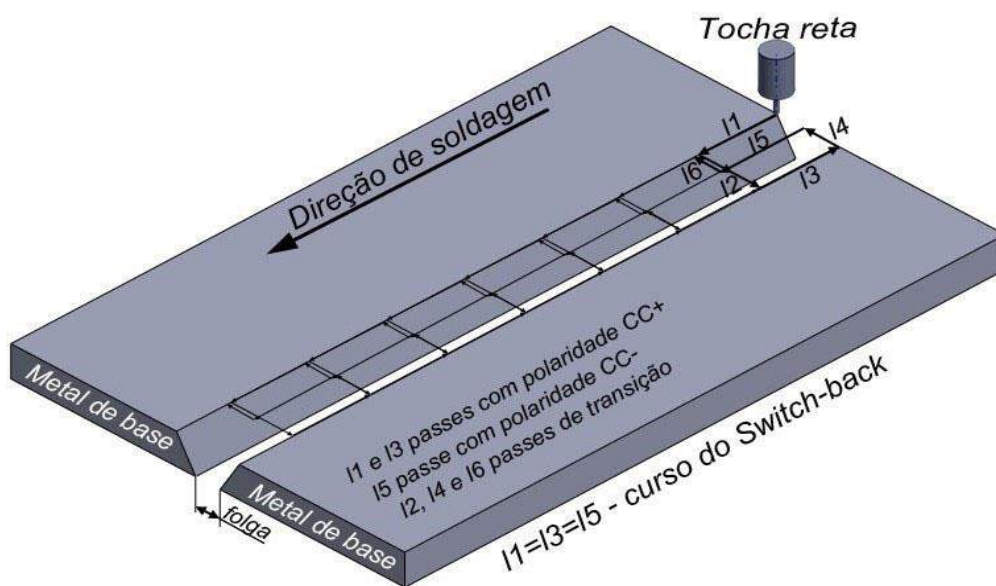


Figura 3.20 – Trajetória de *Switch-back* lateral-lateral-centro aplicada nas chapas chanfradas com folga (abertura de raiz)



Figura 3.21 – Ordem dos passes de soldagem pela técnica *Switch-back* sincronizados com a polaridade do eletrodo

Antes da realização dos testes de soldagem propriamente ditos, a trajetória do movimento de *Switch-back* escolhida foi devidamente verificada para saber se a mesa executava os movimentos que foram programados. No lugar da tocha MIG/MAG foi colocando a tocha TIG com um grafite no lugar do eletrodo, como mostra a Figura 3.22.

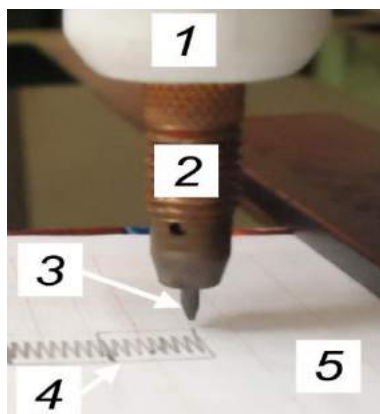


Figura 3.22 – Verificação de movimento da tocha: (1) tocha TIG; (2) bico de contato; (3) grafite; (4) trajetória do grafite; (5) folha milimétrica

A seguir foi programado um caminho com L2 de 10 mm e L1 e L3 também igual a 10 mm. A Figura 3.23 mostra que a mesa de coordenados está calibrada e funciona normalmente.

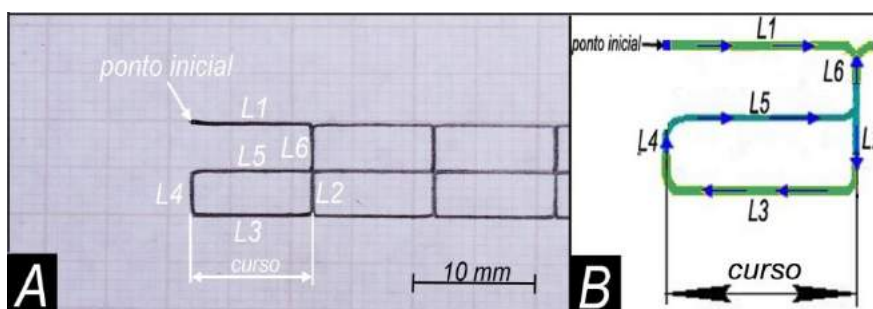


Figura 3.23 – Comparação entre (A) caminho real e (B) caminho programado (teórico)

3.4 – Sincronização da corrente com a posição da tocha

A Figura 3.24 mostra como se dá a sincronização do movimento da tocha com o sinal de corrente do arame-eletrodo, indicando a polaridade em cada parte do movimento. É possível verificar que os sinais dos sensores capacitados a partir do movimento da tocha estão sincronizados com os modos de operação da fonte (CC+ pulsado e CC- continua).

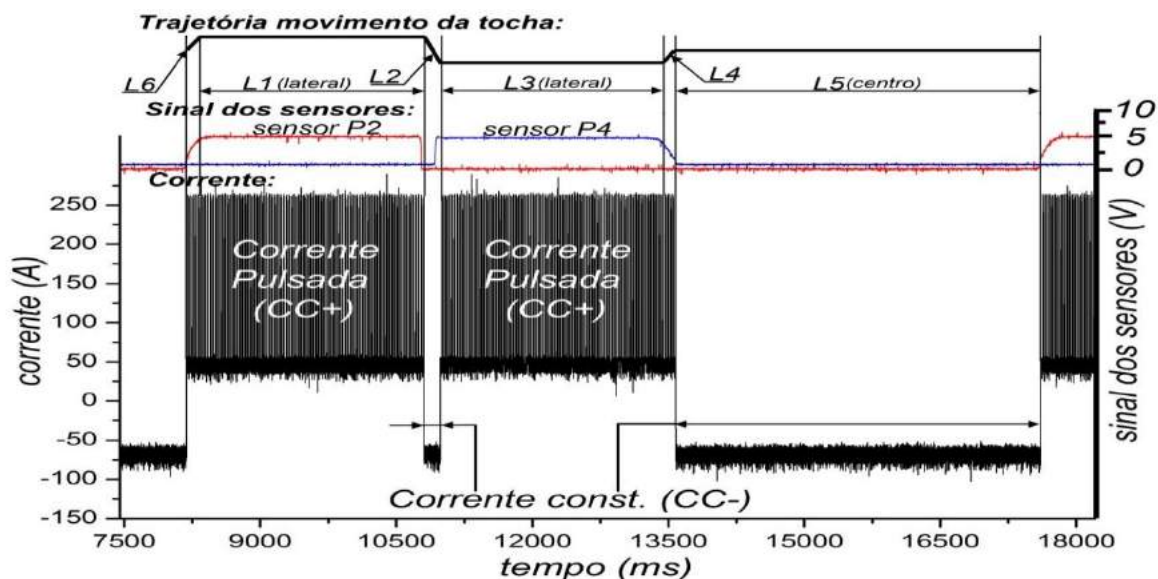


Figura 3.24 – Sincronização do movimento da tocha, sinais dos sensores e troca de polaridade do arame-eletrodo

O passe L2 é na verdade um passe de transição para que a tocha (arco) passe de uma parede do chanfro para a outra. Durante o passe L2 vai-se de CC+ para CC- e depois CC- para CC+. Como a fonte demora no mínimo 100 ms (0,1 s) para trocar de polaridade (programa de operação da fonte), o tempo para que isso ocorra pode chegar então a 200 ms (0,2 s). Como ainda não foi feito o depósito do passe L3 na outra parede do chanfro, a velocidade do deslocamento transversal (L2) precisa ser maior do que a dos passes principais de deposição (laterais e central) para minimizar a deposição no vazio do chanfro que ainda pode ser grande. Assim, a velocidade deste movimento transversal (passe L2) deve ser modificada em função deste tempo e da amplitude de movimento transversal escolhido.

3.5 – Insumos

3.5.1 – Gás de proteção

Durante o trabalho, foram utilizadas duas misturas gasosas, (Ar+5%O₂ e Ar+8%CO₂ (Ar+10%CO₂)), fornecidas em cilindros comerciais. A primeira foi inicialmente adotada por ser uma mistura indicada para a soldagem dos aços com o processo MIG/MAG em corrente pulsada. A segunda devido a sua maior capacidade de transferir calor para a chapa (gás “mais quente”), mas ainda com possibilidade de se usar no modo pulsado. Antes das soldagens, as composições químicas das misturas foram verificadas por meio de um analisador de composição química de mistura gasosa (Oxybaby®). A Tabela 3.6 apresenta

os resultados da verificação de cada mistura. A vazão adotada durante as soldagens foi de 15 l/min. Antes de cada soldagem, a vazão foi confirmada por intermédio de um fluxômetro (bibímetro).

Tabela 3.6 – Verificação da composição química das misturas gasosas

Ar+5%O ₂	Medições					Valor médio
O ₂ (%)	5,4	5,5	5,4	5,4	5,4	5,4
Ar (%)	94,6	94,5	94,6	94,6	94,6	96,6
Ar+8%CO ₂	Medições					Valor médio
CO ₂ (%)	10,2	10,1	10,1	9,9	10,0	10,0
Ar (%)	89,8	89,9	89,9	90,1	90,0	90,0

3.5.2 – Metais de base e de adição

Usou-se como material de base barras-chatas de aço ABNT 1020. Este aço foi escolhido em função do trabalho não propor a soldagem de um aço especial ou outro metal. Como a finalidade era de conhecer os fundamentos da técnica, buscou-se realizar os ensaios em um material facilmente encontrado no mercado e economicamente mais barato. Com relação ao metal de adição, foi utilizado o arame-eletrodo da classe AWS ER70S-6, com 1,2 mm de diâmetro, cuja composição química nominal está apresentada na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Composição química nominal do arame-eletrodo utilizada (AWS, 2005)

Componentes	C	Mn	Si	Cr	P	S	Ni	Mo	V	Cu
Teor, (%)	0,06-0,15	1,40-1,85	0,80-1,15	0,15	0,025	0,035	0,15	0,15	0,03	0,5

Obs: Valores individuais são valores máximos

CAPÍTULO IV

PARAMETRIZAÇÃO DA SOLDAGEM MIG/MAG E DA TÉCNICA *SWITCH-BACK*

4.1 – Definição dos parâmetros de corrente pulsada na polaridade positiva (CC+)

Como explicado anteriormente na metodologia, as soldagens nas laterais da junta foram realizadas com o processo MIG/MAG em corrente pulsada. A definição para se trabalhar em corrente pulsada está ligada ao fato de que ela permite uma transferência metálica no modo goticular (*spray*) de forma controlada (uma gota por pulso), mesmo a baixa corrente média. Esta combinação de transferência em vôo livre (maior momentum) e baixa energia de soldagem (para não prejudicar a poça na região central subsequente) deve permitir a fusão das laterais de forma controlada (volume limitado).

Foram avaliados três níveis de corrente média (90, 100 e 160 A). Para cada um destes níveis de corrente médias (I_m) foram feitos testes de simples deposição sobre a chapa de aço carbono ABNT 1020 (espessura 3,2 mm, largura 50 mm e comprimento 200 mm e limpas com disco de lixa com granulação de 120) na posição plana. Manteve-se invariáveis durante os testes DBCP (distância bico de contato-peça) de 22 mm, V_s (velocidade de soldagem) igual a 5 mm/s, Ar+5%O₂ como gás de proteção, a uma vazão de 15 l/min. O arame utilizado foi da classe AWS ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro.

Adotou-se como corrente de pulso (I_p) o valor de 250 A, valor provavelmente pouco acima da corrente de transição para o gás de proteção usado (Ar+5%O₂), evitando pressão muito alta sobre a poça. Para corrente de base (I_b) fixou-se um baixo valor (40 A), visando atingir as baixas correntes médias desejadas. O tempo de pulso (t_p) foi, então, sistematicamente variado de 7 a 11 ms para encontrar as condições de uma gota por pulso (UGPP). A velocidade de alimentação para cada teste foi ajustada para se manter um comprimento de arco de aproximadamente 4 a 5 mm (visualmente). Porém, para cada valor de t_p , foi necessário se calcular o tempo de base (t_b) para que se mantivesse a corrente média desejada, feito através da Equação 4.1. A frequência de pulsação resultante é determinada pela Equação 4.2.

$$t_b = \frac{(I_p \times t_p) - (I_m \times t_p)}{I_m - I_b} \quad (4.1)$$

$$f_p = \frac{1000}{t_p + t_b} \quad (4.2)$$

onde I_m – corrente média (A), I_p – corrente de pulso (A), I_b – corrente de base (A), t_p – tempo de pulso (ms), t_b – tempo de base (ms) e f_p – frequência de pulsos (Hz).

A Figura 4.1 ilustra o mapa operacional para se obter as condições de UGPP para cada I_m desejada. Usando-se as faixas médias de t_p da condição de cada I_m , definiu-se os parâmetros de soldagem apresentados na Tabela 4.1.

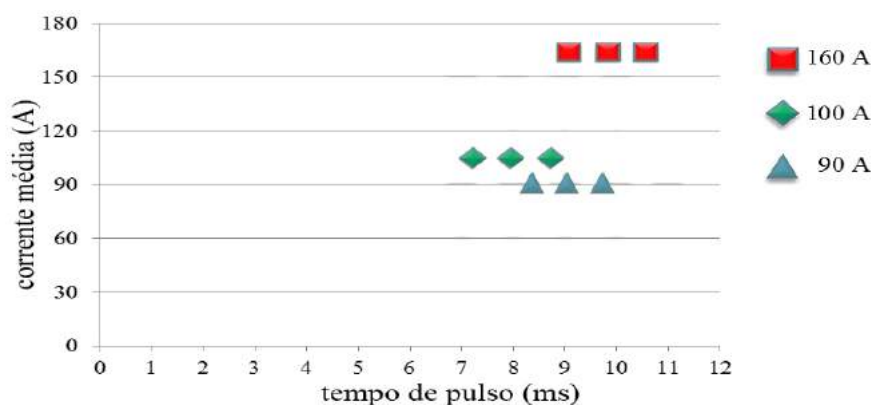


Figura 4.1 – Mapa operacional da região de UGPP no fim de pulso para diferentes correntes médias e tempos de pulsos, para MIG/MAG Pulsado na polaridade positiva (CC+), com DBCP de 22 mm, Ar+5%O₂, arame-eletrodo AWS ER70S-6 de 1,2 mm e uma corrente de pulso de 250 A e tempos de base adequados para cada corrente média (ver em Tabela 4.1): a esquerda dos pontos, menos de UGPP, e a direita mais de UGPP

Tabela 4.1 – Parâmetros de regulação para a soldagem MIG/MAG Pulsado na polaridade positiva (CC+), com DBCP de 22 mm, Ar+5%O₂ e arame-eletrodo AWS ER70S-6 de 1,2 mm

I_m (A)	I_p (A)	I_b (A)	t_p (ms)	t_b (ms)	$Valim$ (m/min)	f_p (Hz)
90	250	40	9	25,0	2,8	29,4
100	250	40	7,7	19,3	2,8	37,0
160	250	40	9,9	6,7	4,8	61,7

Onde, I_m = corrente média (A); I_p = corrente de pulso (A); I_b = corrente de base (A); t_p = tempo de pulso (ms); t_b = tempo de base (ms); $Valim$ = velocidade de alimentação (m/min); f_p = frequência de pulso (Hz)

A Figura 4.2 mostra o aspecto do cordão que foi obtido com a corrente média de 100 A. Os oscilogramas típicos de corrente, de tensão e do sinal luminoso para este caso estão representados na Figura 4.3. Nos casos de corrente média de 90 e 160 A, a aparência dos cordões foi semelhante. Entretanto, para os testes a serem realizados neste trabalho foi

escolhida a corrente média de 100 A para os passes laterais.



Figura 4.2 – Aspecto do cordão realizado com UGPP (uma gota por pulso) com corrente média de 100 A, com soldagem sobre chapa de aço ABNT 1020 de 3,2 mm de espessura (soldagem da esquerda para direita)

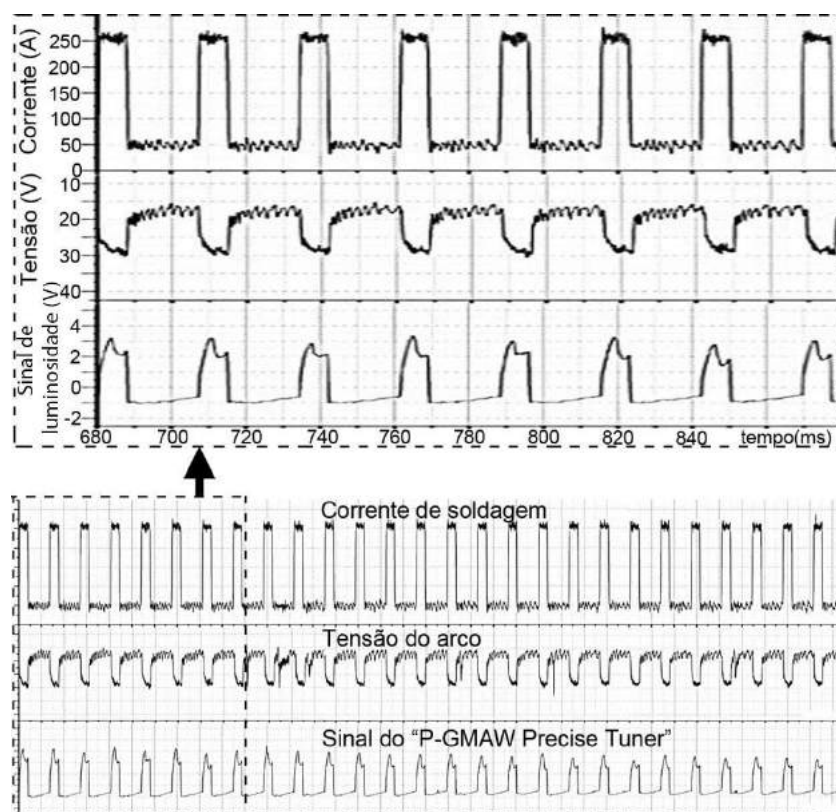


Figura 4.3 – Oscilogramas de corrente, de tensão e de luminosidade (para verificar a transferência das gotas) em MIG/MAG Pulsado convencional (a tensão está com valor invertido)

4.2 – Definição dos parâmetros de corrente contínua na polaridade negativa(CC-)

Como explicado anteriormente na metodologia, a definição para trabalhar em corrente

continua na polaridade negativa (CC-) no passe central (fechamento da raiz) está ligada ao fato de que ela permite obter menor penetração do metal de base e um processo mais “frio” em relação à soldagem MIG/MAG CC+. Como se irá trabalhar com uma corrente média de 100 A nas laterais do chanfro (Item 4.1), a ideia foi utilizar um nível de corrente ainda menor para passe central, ajudando evitar a ocorrência de perfurações no chanfro. Acredita-se que uma corrente em torno de 70 A possa ser adequada.

Assim, a partir de experimentos exploratórios, foi encontrado um valor de corrente na polaridade negativa (CC-) para a velocidade de alimentação de arame igual a 2,8 m/min (igual na CC+) e comprimento do arco de pelo menos 5 mm. Os parâmetros de soldagem encontrados são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros de regulação para a soldagem MIG/MAG corrente contínua na polaridade negativa (CC-), com DBCP de 22 mm, Ar+5%O₂ e arame-eletrodo AWS ER70S-6 de 1,2 mm

I (A)	Valim (m/min)	Vs (mm/s)	Vazão de gás (l/min)
-72	2,8	5	15

Onde, I = corrente de soldagem (A); Valim = velocidade de alimentação (m/min); Vs = velocidade de soldagem (mm/s)

A Figura 4.4 mostra o aspecto do cordão que foi realizado com polaridade negativa (CC-) com valor da corrente igual a -72 A. O cordão é irregular e convexo, o que é típico desta polaridade, mas ao mesmo tempo a solda ocorreu sem penetração (0 mm), o que é adequado em termos de evitar perfurações no meio da junta. A Figura 4.5 mostra os oscilogramas de corrente e tensão resultantes.

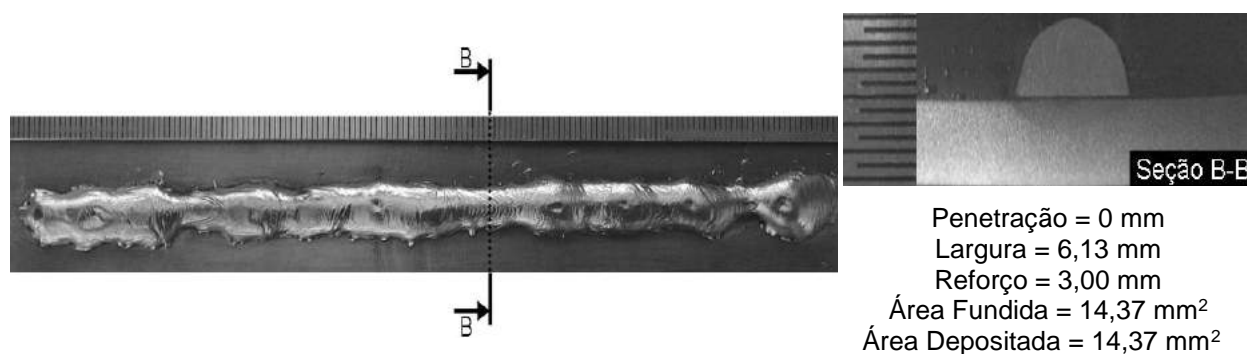


Figura 4.4 – Aspecto do cordão realizado com polaridade negativa (CC-) com corrente de -72 A, com soldagem sobre chapa de aço ABNT 1020 de 3,2 mm de espessura (soldagem da esquerda para direita)

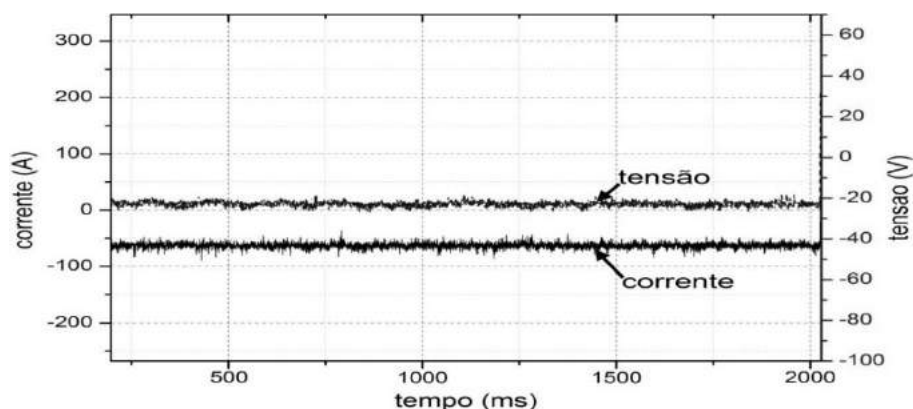


Figura 4.5 – Oscilograma de corrente e tensão em MIG/MAG com corrente contínua na polaridade CC-

4.3 – Avaliação da combinação de polaridades durante soldagem

Depois de escolhidos os parâmetros de soldagem para cada polaridade de maneira separada (Tabelas 4.1 e 4.2), foram feitos alguns testes com combinação de polaridade durante soldagem. A fonte foi programada para operar 3,5 s em cada polaridade (programa de soldagem) com velocidade de alimentação de 2,8 m/min e velocidade de soldagem da tocha igual a 5 mm/s. A Figura 4.6 mostra o sinal de corrente com alternância das polaridades para as dadas condições. No momento de troca de polaridade (programa) foi percebido visualmente uma pequena variação de comprimento do arco, mas apenas momentaneamente, pois a seguir o arco se estabilizava. Pode ser que momentaneamente o balanço de calor no eletrodo é afetado, o que altera sua taxa de fusão instantânea, afetando assim o comprimento do arco temporariamente.

A Figura 4.7 mostra o aspecto típico do cordão resultante, mostrando que o perfil do cordão se modifica de acordo com a polaridade. Uma região do cordão é mais estreita, convexa e de menor penetração, caracterizando o período de CC-, enquanto na região subsequente, período em CC+, aconteceu o contrário. Assim, ficou comprovado que a fonte é capaz de alternar entre os modos de soldagem e que, neste caso, pode-se adicionar mais ou menos calor (controle de penetração) conforme a polaridade. Deve-se chamar atenção para o fato de que, apesar do mesmo tempo em cada polaridade, houve uma variação geométrica desigual do aspecto do cordão, sendo que a região mais estreita (polaridade CC-) é de menor tamanho, possivelmente devido ao efeito predominante do maior valor de volume da poça (durante CC+), que por tensão superficial puxa metal fundido da poça formada em CC-. Uma evidência de tal fato é que no início do cordão (em CC+) não aparece este efeito, uma vez que não existia ainda o cordão em CC- para ser puxado.

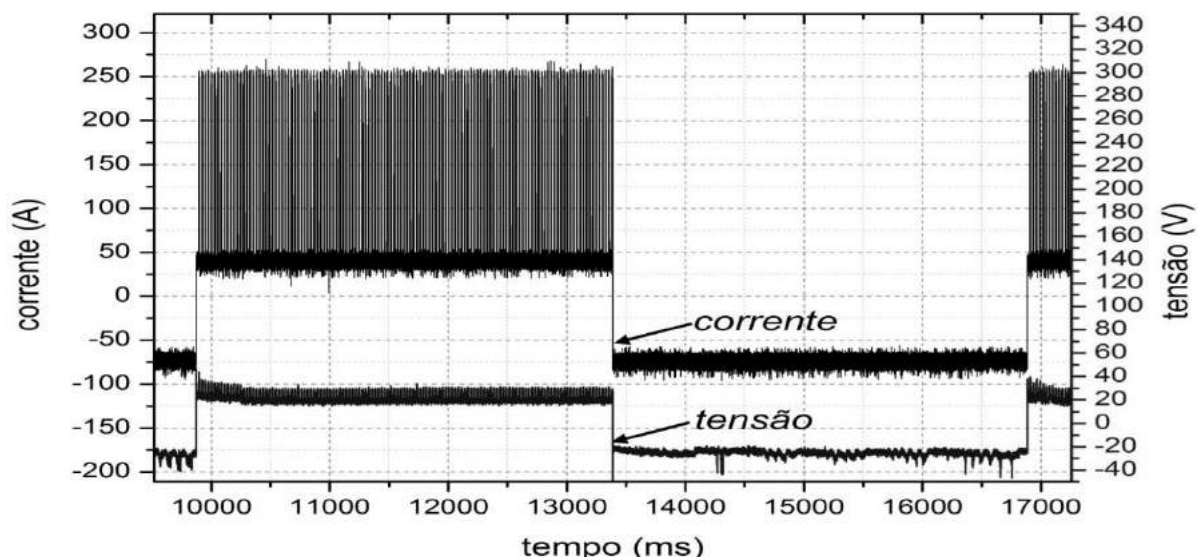


Figura 4.6 – Oscilograma de soldagem MIG/MAG com 3,5 s na polaridade CC+ pulsado e 3,5 s na polaridade CC-

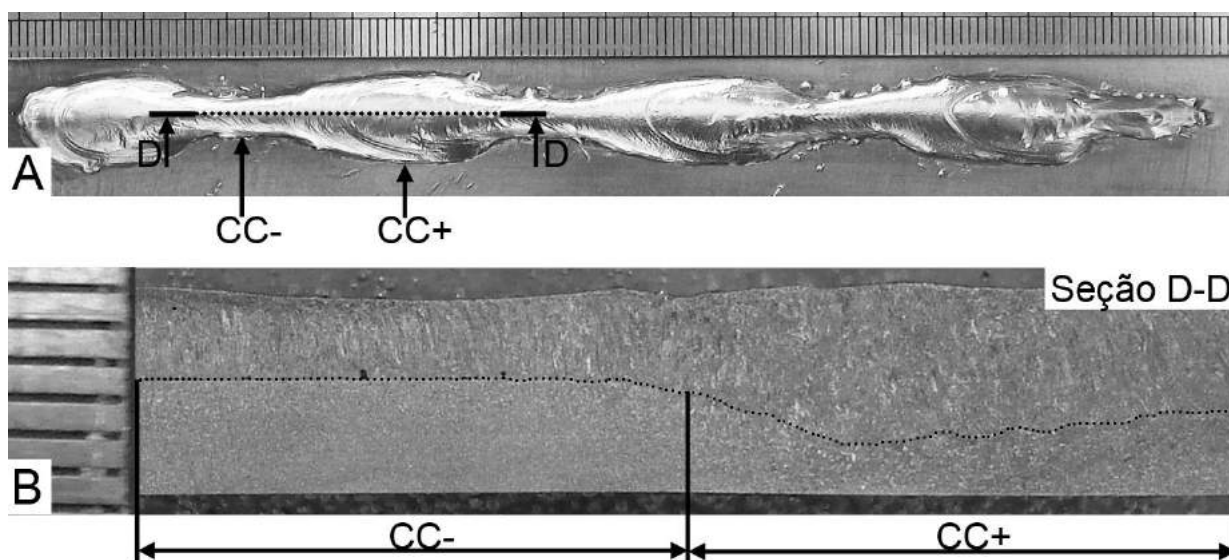


Figura 4.7 – Vista do cordão de solda nas duas polaridades (A) e seção longitudinal de parte do cordão (B), com soldagem sobre chapa de aço ABNT 1020 de 3,2 mm de espessura (soldagem da esquerda para direita)

4.4 – Determinação da velocidade de soldagem (da tocha e equivalente) na técnica *Switch-back*

A trajetória de soldagem *Switch-back* do tipo lateral-lateral-centro inclui 3 tipos de movimentos lineares (Figura 4.8), sendo o primeiro o de avanço, o segundo o transversal e o terceiro o de recuo. Por isso, na verdade, tem-se duas velocidades de soldagem, a primeira aqui denominada de velocidade da tocha (V_t) ou velocidade programada e a outra

de velocidade equivalente (V_{eq}), essa última sempre menor e dependente da velocidade da tocha.

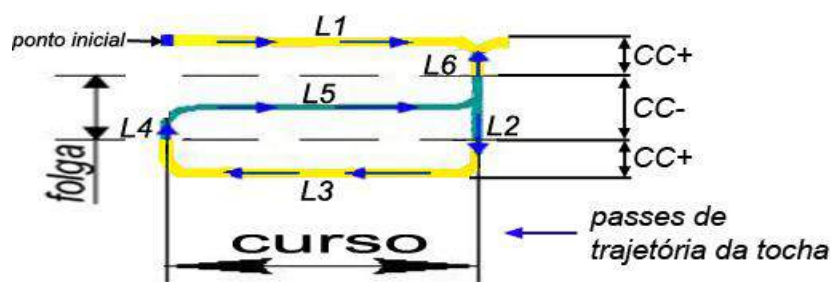


Figura 4.8 – Esquema do movimento da tocha lateral-lateral-centro da técnica *Switch-back* sincronizado com a polaridade do arame-eletrodo (amarelo indica polaridade CC+ e verde indica polaridade CC-)

a) Velocidade de soldagem da tocha (programada)

Como todas as soldagens foram realizadas de forma automática, por intermédio de uma mesa de coordenadas, o operador programa essa velocidade que pode ser igual ou diferente para cada parte da trajetória (caminho) de soldagem.

b) Velocidade equivalente de soldagem

Esta velocidade, além de menor do que a velocidade da tocha (programada), é calculada. Primeiramente, é necessário saber as velocidades da tocha durante os passes de avanço, movimento transversal e recuo que formam a trajetória de soldagem. Os cálculos da velocidade equivalente de soldagem são feitos pela Equação 4.3.

$$V_{eq} = V_t * \frac{\text{Curso}}{\sum_{i=1}^n L_n} \quad (4.3)$$

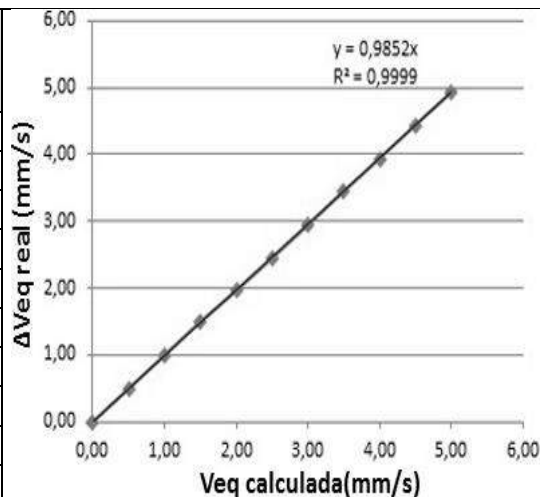
onde V_{eq} – velocidade equivalente de soldagem (mm/s), V_t – velocidade da tocha (programada) de soldagem (mm/s), Curso – comprimento da trajetória do *Switch-back* (Figura 4.8) (mm) e L – passe da trajetória de soldagem por Curso (mm).

Como estas velocidades são calculadas, foi necessário verificar (comparar) as velocidades calculadas com as velocidades reais da mesa coordenadas (folga nos motores de passo, inércia, etc.). Tendo em vista a faixa de trabalho, a verificação foi feita de 0,5 a 5 mm/s com percurso total de movimento de 50 mm, com trajetória do tipo lateral-lateral-centro do *Switch-back* (Figura 4.8), sendo a amplitude e curso iguais a 10 mm. Os dados e

resultados dessa verificação são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Verificação da velocidade equivalente (valor calculado X valor real) para a técnica *Switch-back*

Testes	Tempo (s)	Espaço (mm)	Vt ((mm/s)	Ve _q calc (mm/s)	Ve _q real (mm/s)
1	100,00	50	3,50	0,50	0,50
2	50,00	50	7,00	1,00	1,00
3	33,30	50	10,50	1,50	1,50
4	25,51	50	14,00	2,00	1,96
5	20,41	50	17,50	2,50	2,45
6	17,00	50	21,00	3,00	2,94
7	14,50	50	24,50	3,50	3,45
8	12,70	50	28,00	4,00	3,94
9	11,26	50	31,50	4,50	4,44
10	10,14	50	35,00	5,00	4,93



Onde, V_t = velocidade da tocha (programada) de soldagem (mm/s); $Ve_{q \text{ calc}}$ = velocidade equivalente calculada (pela Equação 4.3) de soldagem (mm/s); $Ve_{q \text{ real}}$ = velocidade equivalente de soldagem real (mm/s)

Os resultados mostram que os valores das velocidades equivalentes calculadas pela Equação 4.3 são muito próximos das velocidades equivalentes reais. Mas é possível verificar pelos dados da tabela que quanto maior a velocidade da tocha (programada), maior é a diferença entre os valores de velocidade equivalente calculados e reais (maior erro), provavelmente devido a problemas de inércia do sistema de movimento. Mas como vai se trabalhar com menos do que 3 mm/s, assume-se a adequabilidade do equipamento.

4.5 – Determinação do volume máximo depositado nas laterais e no meio da junta para abertura de raiz de 6 mm

Foi decidido aplicar a técnica MIG/MAG RSSP na junta com abertura de raiz (folga) elevada de 6 mm para verificar o potencial da técnica em controlar a poça, pelo volume fundido e pela viscosidade (aquecendo nas laterais e resfriando no meio). Esta abertura daria mais condições do efeito de resfriamento atuar do que uma junta com abertura mais estreita.

A seguir é descrito o procedimento adotado para determinar o volume máximo depositado em cada tipo de passe (nas paredes e no centro do chanfro), de forma a produzir poças com estabilidade para se garantir cordões com penetração total e sem perfuração.

4.5.1 – Materiais e métodos

Para realizar os experimentos dessa etapa, foram preparadas chapas de aço ao carbono (ABNT 1020) com espessura de 1/4" (6,3mm), em junta de topo, ângulo de bisel de 30 graus e abertura de raiz (folga) de $6,0 \pm 0,2$ mm (Figure 4.9). Para garantir a manutenção da folga e evitar desalinhamentos e distorções durante as soldagens, as chapas foram presas por pequenos “cachorros” soldados no verso das mesmas, usando-se espaçadores de 6 mm entre eles, como ilustrado pela Figura 4.10. Os espaçadores eram removidos antes das operações de soldagem. Em seguida, a abertura das placas de testes foi conferida entre os elementos de fixação por meio de um paquímetro.

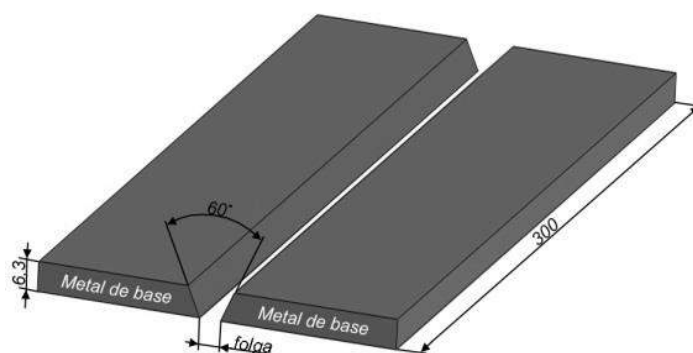


Figura 4.9 – Representação esquemática das placas de teste

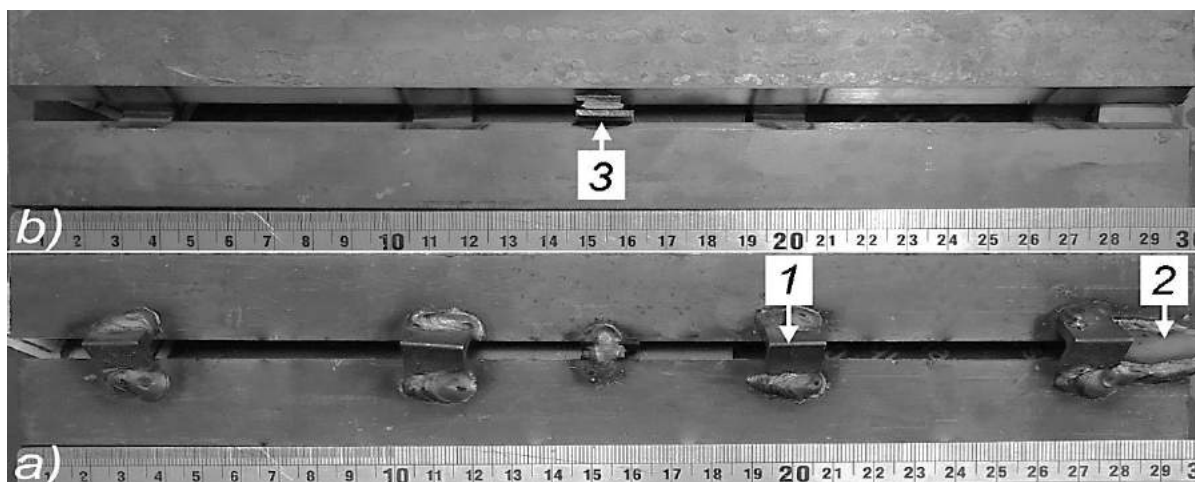


Figura 4.10 – Vista de uma placa de teste, com destaque para a fixação das placas por “cachorros”: a) vista da raiz do chanfro, onde (1) é o “cachorro”, (2) pequena parte de metal para acender o arco; b) vista da face do chanfro, onde (3) é o gabarito (espaçador)

4.5.2 – Determinação do volume máximo depositado nas laterais da junta com abertura de raiz de 6 mm

A ideia foi encontrar inicialmente o volume adequado de material depositado na lateral da junta em função da velocidade de soldagem e da amplitude transversal sem a interferência do passe do centro. Para evitar o efeito da deposição de metal e calor na transição entre as paredes da junta, o arco foi apagado nas transições de uma lateral para a outra colocando a velocidade de alimentação em zero e a corrente em 1 A nesses períodos (apenas para fins de interpretação da fonte para continuidade da programação). Ao chegar na outra lateral, a tocha faz a reversão (passe L3 da Figura 4.8) também em CC+. Ao iniciar o passe transversal L4, o sensor de movimento comanda a troca para a polaridade para CC-. Mas como não foi necessário soldar a parte central da junta, os passes L4 e central L5 foram percorridos com o arco apagado.

Assim, utilizando-se os parâmetros da condição CC+ em cada lateral, para cada amplitude de tecimento ($A = 9, 10, 11$ e 12 mm), a velocidade de movimento da tocha (V_t) foi progressivamente aumentada até que o volume da poça depositada em cada lateral indicasse que haveria penetração total sem perfuração. O seguinte critério foi utilizado:

1. Distância entre cordões (quando menor melhor);
2. Uniformidade do material depositado (com mínimo de escorrimento na raiz);
3. Penetração (total nas paredes dos chanfros).

A Tabela 4.4 mostra a combinação de parâmetros de soldagem usados nesta etapa, enquanto a Figura 4.11 ilustra um oscilograma típico da soldagem nas condições apresentadas na Tabela 4.4. É possível notar que existe um certo atraso do sinal de corrente em relação ao sinal do sensor, pois o arco estava apagado nas transições de movimento transversal. Assim, o arame-eletrodo precisou de um tempo para avançar e reabrir o arco do outro lado da junta. É notório o curto-circuito na abertura do arco antes da fonte realmente entrar no modo de operação CC+ Pulsado. Com relação aos sinais de corrente de soldagem e tensão dos sensores do sistema de movimento da tocha, é possível notar que não houve atraso entre os sinais (Figura 4.11). Além disso, como o arco não foi apagado nas transições de movimento transversal, não ocorreram curtos-circuitos de reabertura de arco.

Tabela 4.4 – Parâmetros de soldagem para cada amplitude de movimento transversal avaliado

Nº exp.	A (mm)	Vt (mm/s)	Ve _q (mm/s)	Curso do Switch-back (mm)
1	9	4,0	1,1	10
2		4,8	1,2	10
3		5,2	1,3	10
4		5,6	1,4	10
5		6,0	1,49	10
6		6,4	1,59	10
7		6,8	1,69	10
8		7,2	1,78	10
9		4,0	0,98	10
10	10	4,8	1,17	10
11		5,2	1,27	10
12		5,6	1,36	10
13		6,0	1,46	10
14		4,0	0,96	10
15	11	4,4	1,05	10
16		4,8	1,14	10
17		5,2	1,24	10
18		5,6	1,33	10
19		6,0	1,42	10
20	12	4,0	0,93	10

Obs 1 (parâmetros variáveis): A = amplitude transversal de movimento da tocha (mm); Vt = velocidade da tocha (programada) de soldagem (mm/s); Ve_q = velocidade equivalente de soldagem (mm/s);

Obs 2 (parâmetros invariáveis): Valim = velocidade de alimentação do arame-eletrodo igual a 2,8 m/min; tipo de gás de proteção = Ar+5%O₂; vazão de gás de proteção igual a 15 l/min; del = diâmetro do arame-eletrodo igual a 1,2 mm; DBCP = distância bico de contato peça igual a 22 mm; Polaridade positiva (CC+): Ip = corrente de pulso igual a 250 A, tp = tempo de pulso igual a 7,7 ms, Ib = corrente de base igual a 40 A, tb = tempo de base igual a 19,3 ms, Im+ = corrente média na polaridade positiva (CC+) igual a 100 A; Polaridade negativa (CC-): Im- = corrente média na polaridade negativa (CC-) igual a -72 A

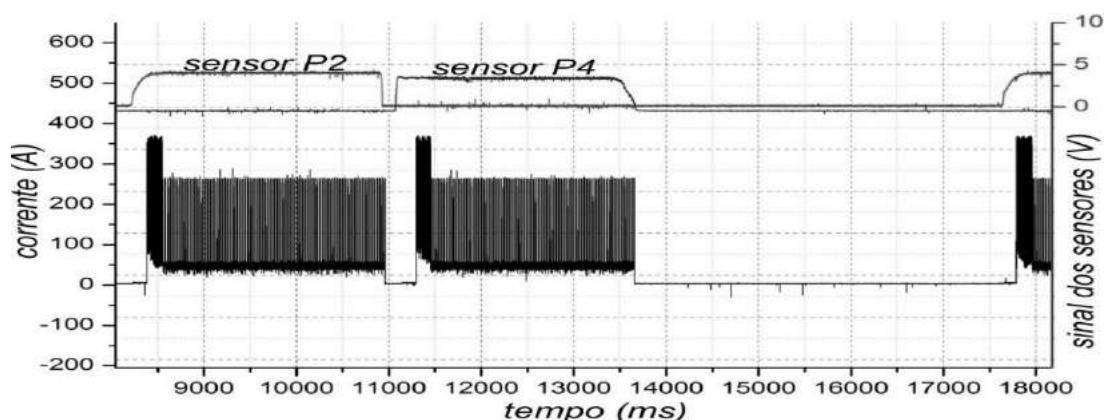


Figure 4.11 – Sinais de corrente de soldagem e tensão dos sensores do sistema de monitoramento da tocha do Experimento 1 (típico de todos os testes)

As características visuais dos cordões dos experimentos realizados são mostradas no Apêndice I. A Figura 4.12 resume os resultados encontrados mostrando as faixas de velocidade da tocha e de soldagem equivalente em função da amplitude de movimento transversal utilizada. Quanto maior a amplitude, menores os valores da faixa de velocidade da tocha em que os cordões atendem os critérios estabelecidos (mais metal de adição pode-se adicionar)

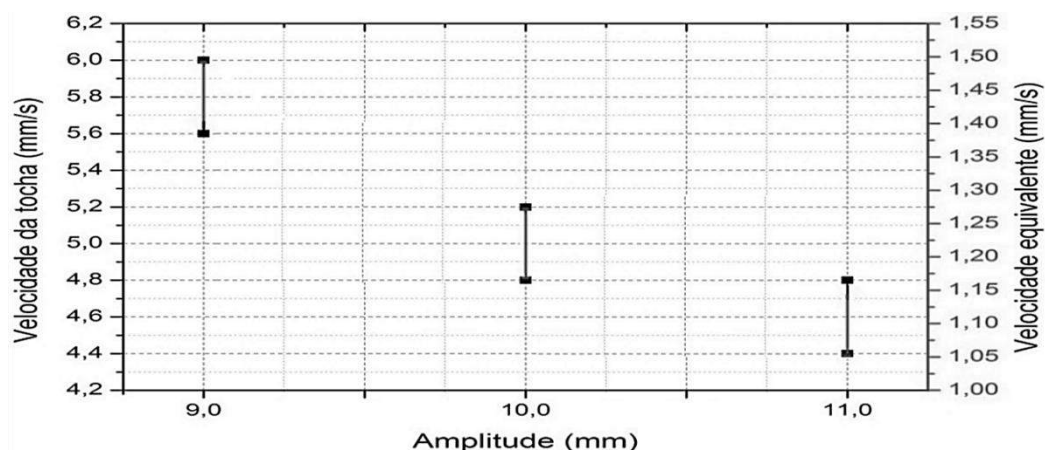


Figura 4.12 – Curva com as faixas das velocidades ótimas para cada amplitude

De posse das faixas de velocidade da tocha mais adequadas para as amplitudes de movimento transversal de 9, 10 e 11 mm, foi possível calcular a área de metal depositado (A_d) nas paredes laterais da junta para cada caso por meio da Equação 4.4.

$$A_d = \frac{(V_{lim} \cdot S_a)}{V_t} \quad (4.4)$$

onde A_d – área de metal depositado (mm^2), V_{lim} – velocidade de alimentação do arame-eletrodo (m/min), S_a – área transversal do arame-eletrodo (mm^2), V_t – velocidade da tocha (programada) de soldagem (mm/s)

A Figura 4.13 mostra as faixas adequadas de área depositada em função da amplitude de movimento transversal e incluindo as velocidades da tocha correspondentes.

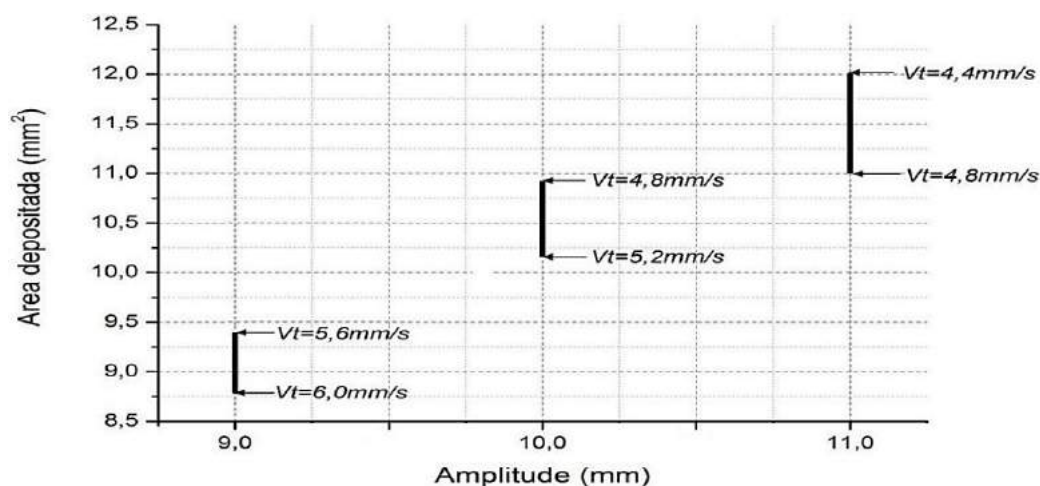


Figura 4.13 – Áreas depositadas nas laterais da junta mais adequadas versus amplitude de movimento transversal

4.5.3 – Determinação do volume máximo depositado no centro da junta com abertura de raiz de 6 mm

O objetivo desta fase foi encontrar, usando o melhor resultado da fase anterior (volume máximo depositado nas laterais), o volume adequado de material depositado no meio da junta (passe com CC-). Para isto, foi usado inicialmente a condição mais favorável dos passes na lateral (amplitude de oscilação de 10 mm e velocidade da tocha de 5 mm/s) e foi variado tanto o comprimento de avanço e reversão como a velocidade de soldagem visando se atingir o cordão desejado. Como neste caso o foco de avaliação é o passe no meio, o arco não foi mais apagado durante a transição de lados da junta. A Tabela 4.5 mostra a sequência de testes realizada nesta etapa. Já a Figura 4.14 mostra os sinais de corrente de soldagem e tensão dos sensores de trajetória da tocha para o Experimento 23. Estes sinais foram similares para todos os outros testes desta sub-etapa.

Tabela 4.5 – Sequência de testes de soldagem para determinação do volume máximo depositado no centro da junta

Nº exp	A (mm)	VtCC+ (mm/s)	VtCC- (mm/s)	Veq (mm/s)	Curso do Switch-back (mm)
21	10	5	2,2	0,77	5
22		5	2,2	0,87	7,5
23		5	2,2	0,93	10
24	10	5	3,4	0,88	5
25		5	3,4	1,01	7,5
26		5	3,4	1,09	10
27	10	5	4,2	0,93	5

Nº exp	A	VtCC+	VtCC-	Veq	Curso do
28		5	4,2	1,07	7,5
29		5	4,2	1,17	10
30		5	4,2	1,27	15

Obs 1 (parâmetros variáveis): A = amplitude transversal de movimento da tocha (mm); VtCC+ = velocidade da tocha (programada) de soldagem na polaridade positiva (CC+) (mm/s); VtCC- = velocidade da tocha (programada) de soldagem na polaridade negativa (CC-) (mm/s); Veq = velocidade equivalente de soldagem (mm/s);

Obs 2 (parâmetros invariáveis): Valim = velocidade de alimentação do arame-eletrodo igual a 2,8 m/min; tipo de gás de proteção = Ar+5%O₂; vazão de gás de proteção igual a 15 l/min; del = diâmetro do arame-eletrodo igual a 1,2 mm; DBCP = distância bico de contato peça igual a 22 mm; Polaridade positiva (CC+): Ip = corrente de pulso igual a 250 A, tp = tempo de pulso igual a 7,7 ms, Ib = corrente de base igual a 40 A, tb = tempo de base igual a 19,3 ms, Im+ = corrente media na polaridade positiva (CC+) igual a 100 A; Polaridade negativa (CC-): Im- = corrente na polaridade negativa (CC-) igual a -72 A

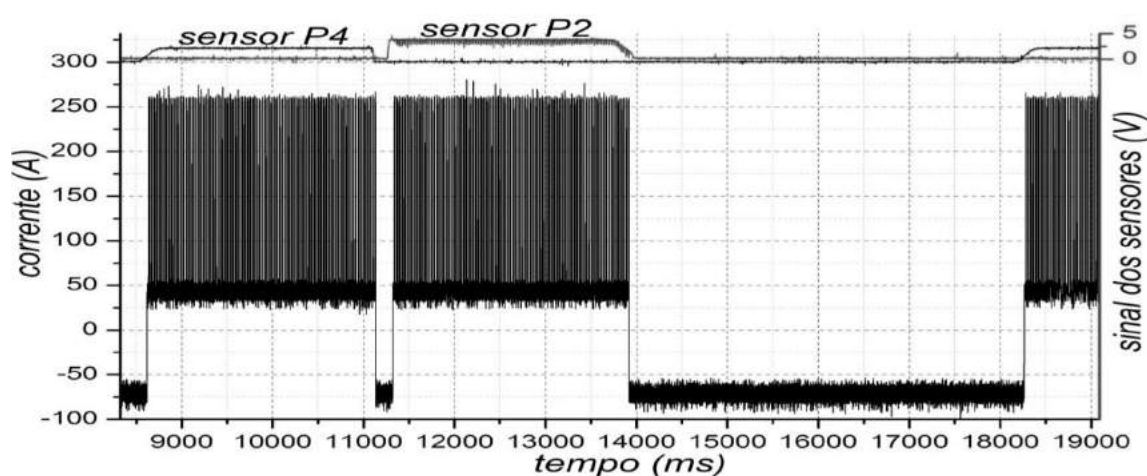


Figura 4.14 – Sinais de corrente de soldagem e tensão dos sensores do sistema de monitoramento da tocha do Experimento 23 (típico de todos os testes)

Os resultados das características visuais dos cordões dos experimentos realizados são mostrados no Apêndice II. Em função dos resultados apresentados com a amplitude de 10 mm (discutidos mais adiante) foram realizados testes também com a amplitude de 11 mm, como indicado na Tabela 4.6, cujas características visuais dos cordões realizados são mostrados no Apêndice III.

Tabela 4.6 – Sequência de testes de soldagem para determinação do volume máximo depositado no centro da junta

Nº exp	A (mm)	VtCC+ (mm/s)	VtCC- (mm/s)	Veq (mm/s)	Curso do Switch-back (mm)
31	11	4,4	3,6	1,00	10
32		4,4	4,0	1,03	10
33		4,4	4,4	1,05	10
34		4,8	4,8	1,14	10

Obs 1 (parâmetros variáveis): A = amplitude transversal de movimento da tocha (mm); VtCC+ = velocidade da tocha (programada) de soldagem na polaridade positiva (CC+) (mm/s); VtCC- = velocidade da tocha (programada) de soldagem na polaridade negativa (CC-) (mm/s); Veq = velocidade equivalente de soldagem (mm/s);

Obs 2 (parâmetros invariáveis): Valim = velocidade de alimentação do arame-eletrodo igual a 2,8 m/min; tipo de gás de proteção = Ar+5%O₂; vazão de gás de proteção igual a 15 l/min; del = diâmetro do arame-eletrodo igual a 1,2 mm; DBCP = distância bico de contato peça igual a 22 mm; Polaridade positiva (CC+): Ip = corrente de pulso igual a 250 A, tp = tempo de pulso igual a 7,7 ms, Ib = corrente de base igual a 40 A, tb = tempo de base igual a 19,3 ms, Im+ = corrente média na polaridade positiva (CC+) igual a 100 A; Polaridade negativa (CC-): Im- = corrente média na polaridade negativa (CC-) igual a -72 A

Em função dos resultados apresentados com a amplitude de 10 mm (discutidos mais adiante) foram realizados testes também com a amplitude de 12 mm, como indicado na Tabela 4.7. A visualização das soldas é apresentada no Apêndice IV.

Tabela 4.7 – Sequência de testes de soldagem para determinação do volume máximo depositado no centro da junta

Nº exp	A (mm)	VtCC+ (mm/s)	VtCC- (mm/s)	Veq (mm/s)	Curso do Switch-back (mm)
35	12	4,0	3,5	0,90	10
36		4,0	4,0	0,93	10
37		4,0	4,5	0,96	10
38		5,0	3,5	1,06	10
39		5,0	4,0	1,10	10
40		5,0	4,5	1,13	10

Obs 1 (parâmetros variáveis): A = amplitude transversal de movimento da tocha (mm); VtCC+ = velocidade da tocha (programada) de soldagem na polaridade positiva (CC+) (mm/s); VtCC- = velocidade da tocha (programada) de soldagem na polaridade negativa (CC-) (mm/s); Veq = velocidade equivalente de soldagem (mm/s);

Obs 2 (parâmetros invariáveis): Valim = velocidade de alimentação do arame-eletrodo igual a 2,8 m/min; tipo de gás de proteção = Ar+5%O₂; vazão de gás de proteção igual a 15 l/min; del = diâmetro do arame-eletrodo igual a 1,2 mm; DBCP = distância bico de contato peça igual a 22 mm; Polaridade positiva (CC+): Ip = corrente de pulso igual a 250 A, tp = tempo de pulso igual a 7,7 ms, Ib = corrente de base igual a 40 A, tb = tempo de base igual a 19,3 ms, Im+ = corrente média na polaridade positiva (CC+) igual a 100 A; Polaridade negativa (CC-): Im- = corrente média na polaridade negativa (CC-) igual a -72 A

Antes de avaliar a velocidade adequada da tocha no meio da junta (função do volume de metal depositado) nas características visuais dos cordões, definiu-se um critério de aceitabilidade para julgar o melhor resultado baseado na especificidade do passe central, a saber:

1. Ausência de perfuração nos cordões;
2. Uniformidade do material depositado (mínimo escorrimento na raiz);
3. Penetração total;
4. Repetibilidade.

Nos Experimentos de 21 a 23 (Figura A2.1, Apêndice II) ocorreram grandes perfurações com escorrimento na raiz. Isso significa que metal de adição foi adicionado no meio da junta, ou seja, a velocidade no passe central de 2,2 mm/s é muito baixa. Como forma de contornar o excesso de deposição, os Experimentos de 24 a 26 (Figura A2.2, Apêndice II) foram feitos com a velocidade da tocha em 3,4 mm/s. Entretanto, ainda ocorreu perfuração, mas com menor escorrimento na raiz (as gotas na raiz dos cordões foram menores).

Os Experimentos de 27 a 29 (Figura A2.3, Apêndice II) foram realizados com a velocidade da tocha em 4,2 mm/s no meio da junta. Neste caso, houve ainda menos escorrimento na raiz da junta, mas as perfurações persistiram. Nota-se que com o curso do *Switch-back* em 5 mm ocorreu mais perfuração do que com 10 mm. Isso indica que o curso de 10 mm parece produzir uma poça de fusão mais fria comparado aos outros cursos utilizados.

Assim, o Experimento 30 (Figura A2.4, Apêndice II) foi realizado com curso de *Switch-back* de 15 mm, mantendo-se a velocidade no meio em 4,2 mm/s para verificar uma possível melhora nas características do cordão. Todavia, não parece ter ocorrido melhoras significativas (a poça ainda parece ser muito quente no momento de troca de polaridade de CC+ para CC-, ou seja, na transição entre os passes L3 (lateral) e L4 (transversal entrando no meio da junta) da Figura 4.8. Durante a soldagem, é possível notar que nesse momento acontece a perfuração no meio da junta. Como as gotas do metal de adição parecem ser muito grandes na polaridade CC-, ao caírem na poça (material fundido muito quente), sem contar com apoio adequado (solda sem cobrejunta) e devido à folga, elas batem na poça de fusão e causam as perfurações no cordão.

Como a amplitude de 10 mm não se mostrou adequada, Experimentos de 31 a 32 (Figuras A3.1, Apêndice III), este parâmetro foi mudado para 11 mm com as velocidades da tocha nas laterais da junta adequadas (Figura A3.2, Apêndice III). O objetivo dessa mudança foi tentar distribuir melhor o calor nas laterais da junta (resultando em uma poça mais fria). Apesar da insistência das perfurações, parece ter ocorrido uma melhora nos

Experimentos 33 e 34, entretanto sem repetibilidade. Com relação os Experimentos de 35 até 40 (Figuras A4.1 e A4.2, Apêndice IV) com amplitude de movimento transversal da tocha de 12 mm aconteceram perfurações.

Para todos os testes, é possível notar que as partes dos cordões com os melhores resultados coincidiram com a posição dos “cachorros”, o que parece bem razoável, já que a massa desses elementos de fixação absorvem parte do calor imposto, ajudando assim no resfriamento da poça de fusão imediatamente acima.

Assim, apesar de ter se definido um volume unitário (área) máximo que pode ser depositado nas laterais da junta, não foi possível encontrar um volume máximo que pode ser depositado no meio da junta, pois a poça para as condições testadas parece ser muito quente para a folga (gap) utilizada.

4.6 – Determinação da influência da amplitude de movimento transversal da tocha e velocidade de soldagem sobre a formação do cordão de solda para uma abertura de raiz (folga) de 4 mm

Devido as dificuldades de produzir um cordão adequado para uma folga de 6 mm, principalmente relacionadas à deposição do passe central da junta, para os testes seguintes a folga foi reduzida para 4 mm.

a) Estudo da amplitude do movimento transversal da tocha

Primeiramente foram determinadas as amplitudes de soldagem nas placas de teste com folga de 4 mm, através do método da proporcionalidade linear (Equação 4.5) aplicado nos melhores resultados que foram obtidos nos testes de 6 mm de folga.

$$A(x) = \frac{f(x) * A(y)}{f(y)} \quad (4.5)$$

onde $f(x)$ - folga (abertura de raiz) igual a x mm, $f(y)$ - folga (abertura de raiz) igual a y mm, $A(x)$ - valor da amplitude de movimento transversal da tocha para x mm da folga (mm); $A(y)$ - valor adequado da amplitude de movimento transversal da tocha para y mm da folga (mm).

Na etapa anterior (Item 4.5) foram encontradas os valores das amplitudes adequadas para a soldagem das placas com a folga igual a $6,0 \pm 0,2$ mm, no caso 11 e 12 mm. Pela Equação 4.5 foram calculadas os valores das amplitudes de movimento transversal da tocha como 8 e 9 mm, provavelmente adequadas para soldagens com folga

de $4,0 \pm 0,2$ mm. Os seguintes critérios de aceitabilidade para os cordões produzidos foram seguintes:

1. Cordões sem perfurações;
2. Penetração total nas paredes dos chanfros;
3. Bom acabamento na face de raiz do cordão.

A Tabela 4.8 mostra a combinação de parâmetros de soldagem utilizados nesta etapa, enquanto a Figura 4.15 ilustra um oscilograma típico da soldagem (sinais de corrente e dos sensores do sistema de monitoramento da tocha). Os valores da velocidade da tocha nas laterais da junta (polaridade CC+) foram extraídos do Item 4.5. Os resultados das características visuais dos cordões dos experimentos realizados são mostrados nas Figura de 4.16 até 4.19.

Tabela 4.8 – Sequência dos testes de soldagem para determinação da amplitude de movimento transversal da tocha para folga de 4 mm

Nº exp.	A (mm)	VtCC+ (mm/s)	VtCC- (mm/s)	Veq (mm/s)	Curso do Switch-back (mm)	tempo CC+/tempo CC- – por ciclo (s) ou (%)
48	9	5,2	4,0	1,21	10	3,85/2,50 (60/40)
49		4,4	4,0	1,08	10	4,54/2,50 (65/35)
50	8	5,2	4,0	1,24	10	3,85/2,50 (60/40)
51		4,4	4,0	1,11	10	4,54/2,50 (65/35)

Obs 1 (parâmetros variáveis): A = amplitude transversal de movimento transversal da tocha (mm); VtCC+ = velocidade da tocha nas laterais da junta (mm/s); VtCC- = velocidade da tocha no meio da junta (mm/s); Veq = velocidade equivalente de soldagem (mm/s)

Obs 2 (parâmetros invariáveis): Polaridade positiva (CC+): Ip = corrente de pulso igual a 250 A; tp = tempo de pulso igual a 7,7 ms; Ib = corrente de base igual a 40 A; tb = tempo de base igual a 19,3 ms; Im+ = corrente média na polaridade positiva igual a 100 A; Polaridade negativa (CC-): Im- = corrente média na polaridade negativa (CC-) igual a -72 A; DBCP = distância bico de contato peça igual a 22 mm; Valim = velocidade de alimentação igual a 2,8 m/min

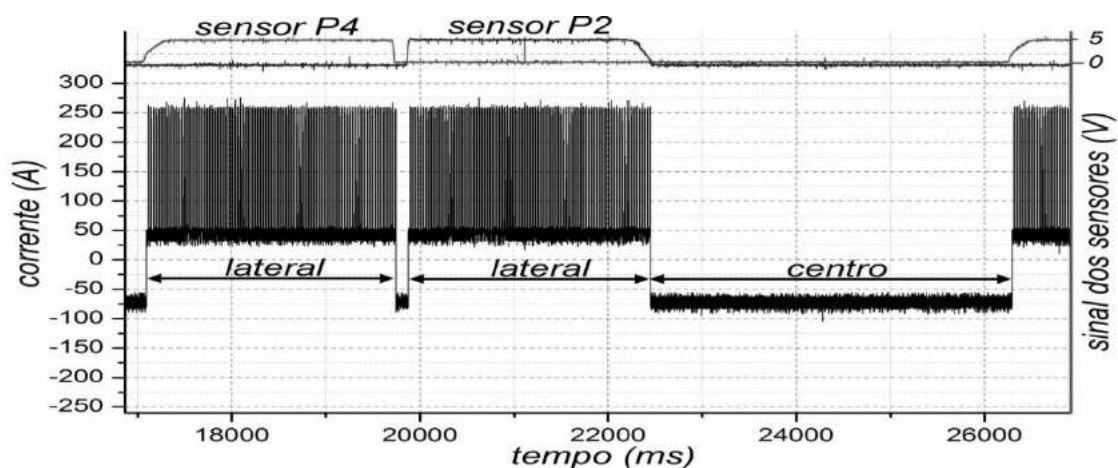


Figura 4.15 – Sinais de corrente de soldagem e tensão dos sensores do sistema de monitoramento da tocha do Experimento 48 (típico de todos os testes)

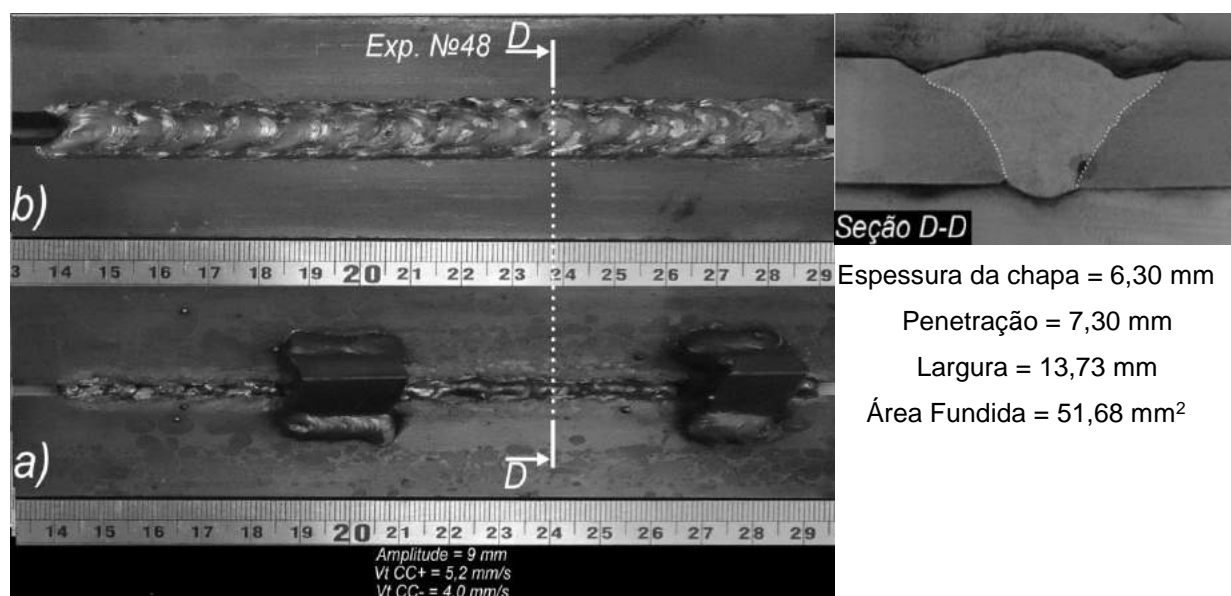


Figura 4.16 – Aspecto do cordão do Experimento 48 com MIG/MAG com técnica *Switch-back* (curso de 10 mm), com polaridade CC+ nas laterais e CC- no meio da junta: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da direita para esquerda)

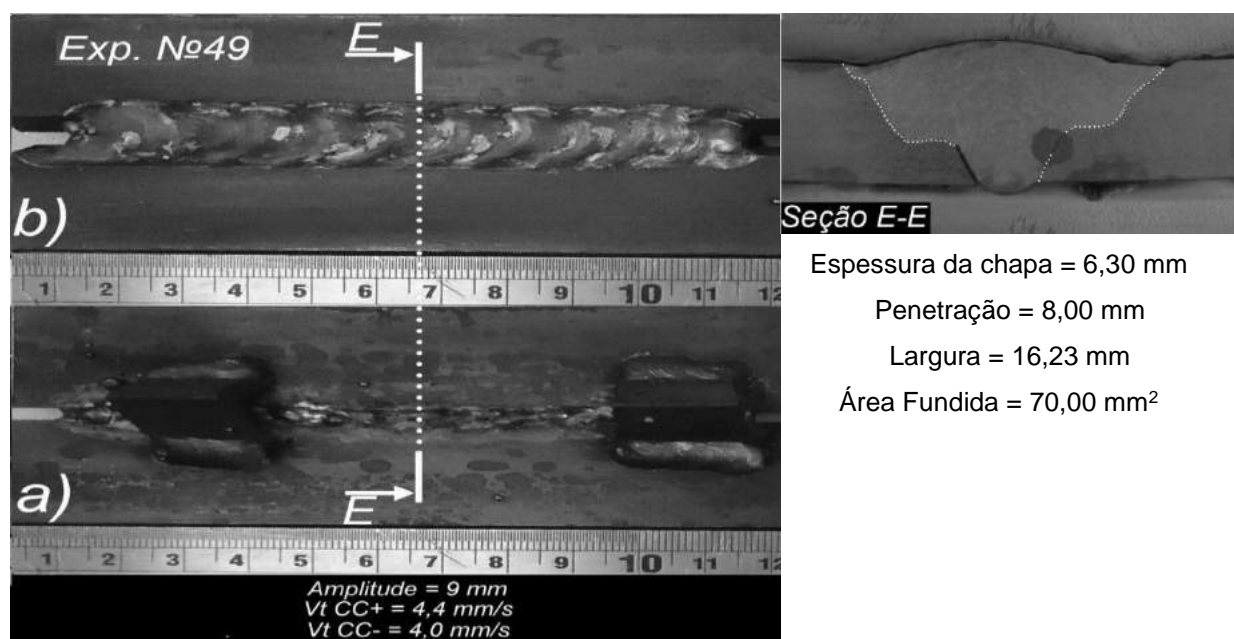


Figura 4.17 – Aspecto do cordão do Experimento 49 com MIG/MAG com técnica *Switch-back* (curso de 10 mm), com polaridade CC+ nas laterais e CC- no meio da junta: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da direita para esquerda)

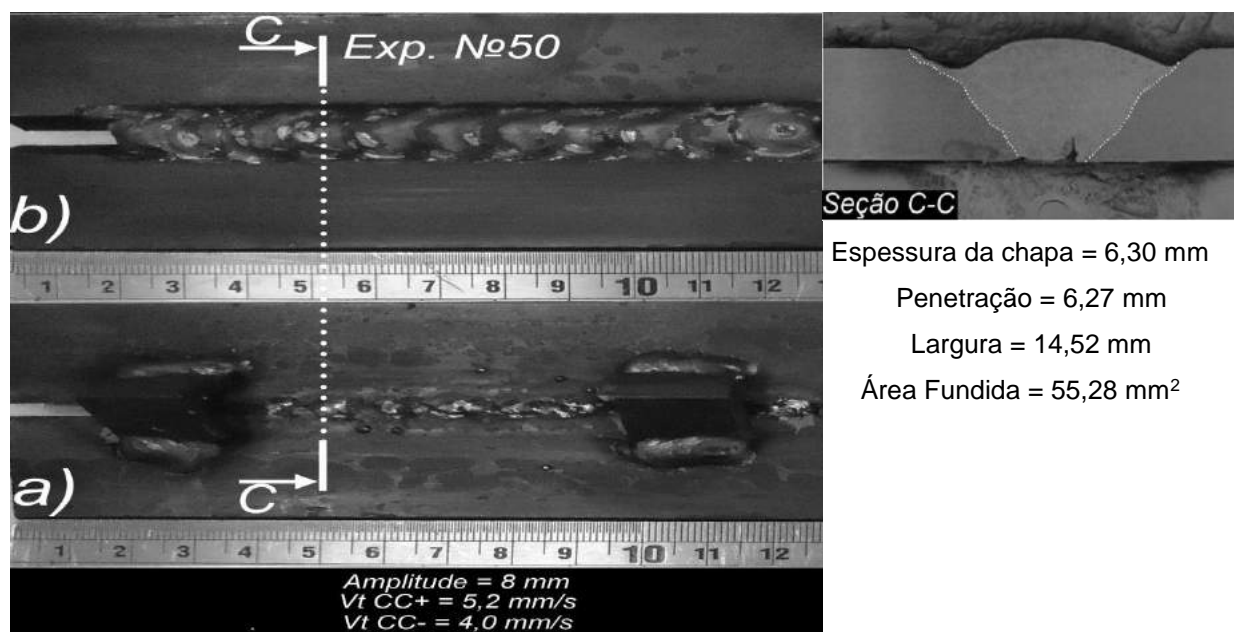


Figura 4.18 – Aspecto do cordão do Experimento 50 com MIG/MAG com técnica *Switch-back* (curso de 10 mm), com polaridade CC+ nas laterais e CC- no meio da junta: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

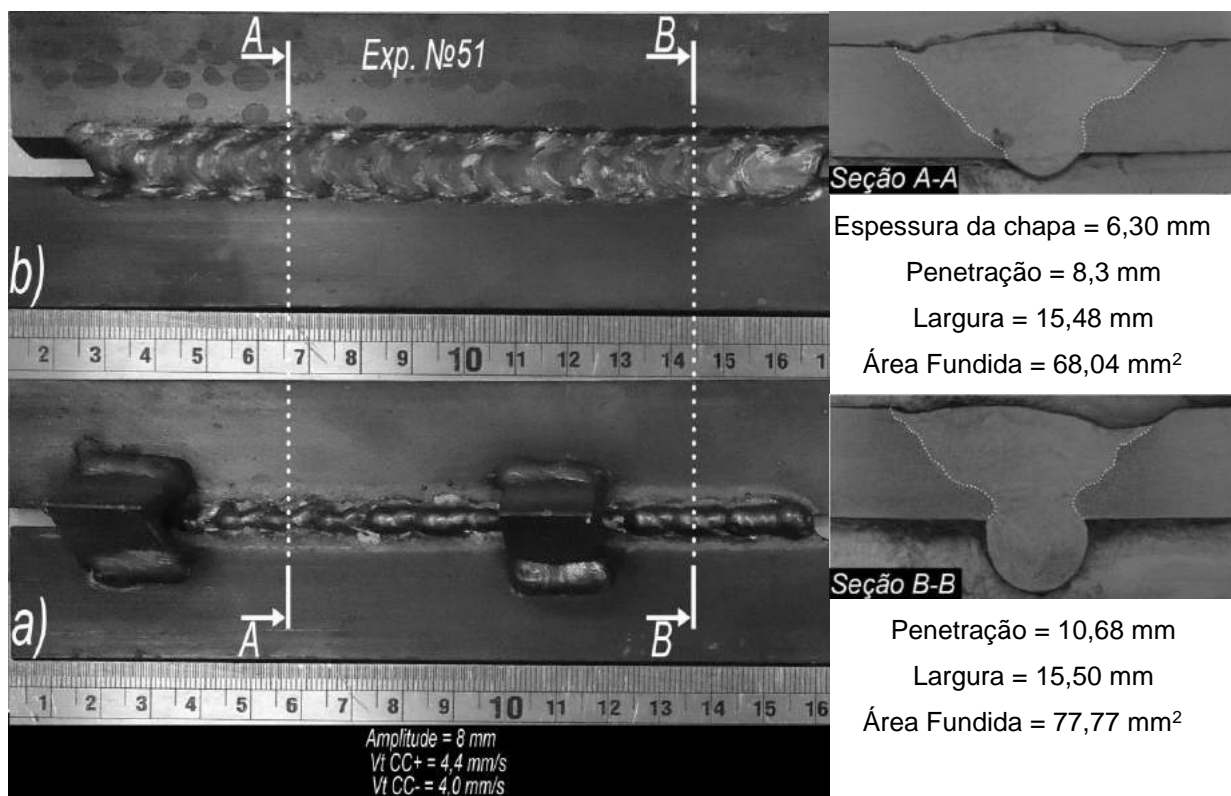


Figura 4.19 – Aspecto do cordão do Experimento 51 com MIG/MAG com técnica *Switch-back* (curso de 10 mm), com polaridade CC+ nas laterais e CC- no meio da junta: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

Em relação às perfurações nas juntas, todos os experimentos mostraram conformidade, exceto o Experimento 51 (menor amplitude e menor velocidade), que ao longo da junta tem a penetração aumentada além do desejado. Pelo Experimentos 48 e 49, com velocidades nas laterais de 5,2 e 4,4 mm/s, respectivamente, e com amplitude de movimento transversal de 9 mm, percebe-se que as velocidades laterais e, consequentemente as velocidades equivalentes, mostram pequena influência sobre a penetração na face de raiz dos cordões. Entretanto, as Figuras 4.16 e 4.17 mostram que, apesar da boa penetração de ambas, não houve bom acabamento de face de raiz dos cordões, assim como se percebe falta de fusão nas paredes dos chanfros. A redução da velocidade equivalente de soldagem mostrou reduzir um pouco o problema de falta de fusão, apesar de reduzir a produtividade de soldagem. Já pelos Experimentos 50 e 51, com velocidades nas laterais de 5,2 e 4,4 mm/s, respectivamente, mas com amplitude de movimento transversal da tocha de 8 mm, percebe-se que as velocidades laterais e, consequentemente as velocidades equivalentes, influenciam na face de raiz dos cordões. Como visto no cordão do Experimento 51 (Figura 4.19), a face de raiz parece ter penetração total e tem bom acabamento, o que não é notório no Experimento 50 (Figura 4.18). Como o Experimento 51 tem menor velocidade de soldagem, o arco passa mais tempo agindo,

resultado em maior área de fusão e penetração, inclusive com bom acabamento e geometria do cordão (reforça com certa uniformidade).

Como esperado, percebe-se que a área de fusão com velocidade da tocha de soldagem menor é maior (quando menor a velocidade mais metal de adição e energia em forma de calor são adicionados num dado tempo). Entretanto o perfil de penetração (geometria da área fundida) se modificou como mostram as seções das Figuras 4.16 e 4.17 (a penetração nas laterais da Seção E-E da Figura 4.17 é maior). Isso pode ser atribuído a fato de que, neste caso, o arco fica mais tempo nas laterais, com mais tempo então para ação do calor do arco e do momento das gotas transferidas na polaridade CC+.

Comparando os cordões dos experimentos nos quais a diferença foi apenas nas amplitudes (Seções D-D e C-C (Experimentos 48 e 50) e Seções E-E e A-A (Experimentos 49 e 51)), percebe-se que com menor amplitude obteve-se menor diferenciação na influência das polaridades. Ao aumentar a amplitude, parece que o arco tem maior independência de atuação nas regiões da junta (quanto mais longe estão as laterais do centro, ou seja, maior a amplitude, menos o calor e a transferência metálica de cada polaridade tem influência sobre a outra). Em outras palavras, ao aumentar a amplitude estar-se, então, indo na direção de separar os cordões (evidenciado pela geometria da área fundida). Com maior amplitude obtém-se maior penetração nas laterais e centro da junta. Isso acontece, porque tem maior comprimento de movimento transversal do arco (tocha).

Talvez uma forma de resolver o problema do acabamento da face da raiz seria, para uma mesma amplitude, utilizar menores velocidades nas laterais da junta para aquecer e fundir um pouco mais estas regiões da mesma, facilitando que a fusão alcance as partes mais inferiores do chanfro.

No contexto geral, os experimentos da Tabela 4.8 indicam que o processo pode ser bem sensível (provavelmente sem robustez); uma pequena mudança na velocidade (apenas de 0,8 mm/s) ou na amplitude (1 mm) modifica a geometria e acabamento dos cordões.

b) Estudo da velocidade nas laterais da junta

O objetivo desta etapa foi encontrar o valor adequado da velocidade de soldagem nas laterais (V_{tCC+}) da junta e estudar a influência dessa velocidade para uma amplitude mantida de 9 mm para a folga de $4,0 \pm 0,2$ mm.

A Tabela 4.9 mostra a combinação dos parâmetros de soldagem utilizados, enquanto a Figura 4.15 ilustra um oscilograma típico da soldagem (sinais de corrente e dos sensores do sistema de monitoramento da tocha). Os resultados das características visuais dos cordões dos experimentos realizados são mostrados nas Figuras de 4.20 até 4.23.

Tabela 4.9 – Sequência dos testes de soldagem para estudo a influência da velocidade lateral para a folha de 4 mm

Nº exp.	A (mm)	Vt CC+ (mm/s)	Vt CC- (mm/s)	Ve _q (mm/s)	Curso do Switch-Back (mm)	tempo CC+/tempo CC- – por ciclo (s) ou (%)
52	9	3,0	4,0	0,81	10	6,66/2,50 (73/27)
53		4,0	4,0	1,01	10	5/2,50 (55/45)
54		3,6	4,0	0,93	10	5,55/2,50 (60/40)
54r		3,6	4,0	0,93	10	5,55/2,50 (60/40)

Obs 1 (parâmetros variáveis): A = amplitude transversal de movimento transversal da tocha (mm); VtCC+ = velocidade da tocha nas laterais da junta (mm/s); VtCC- = velocidade da tocha no meio da junta (mm/s); Ve_q = velocidade equivalente de soldagem (mm/s);

Obs 2 (parâmetros invariáveis): Polaridade positiva (CC+): I_p = corrente de pulso igual a 250 A; t_p = tempo de pulso igual a 7,7 ms; I_b = corrente de base igual a 40 A; t_b = tempo de base igual a 19,3 ms; I_{m+} = corrente média na polaridade positiva igual a 100 A; Polaridade negativa (CC-): I_{m-} = corrente média na polaridade negativa (CC-) igual a -72 A; DBCP = distância bico de contato peça igual a 22 mm; Valim = velocidade de alimentação igual a 2,8 m/min

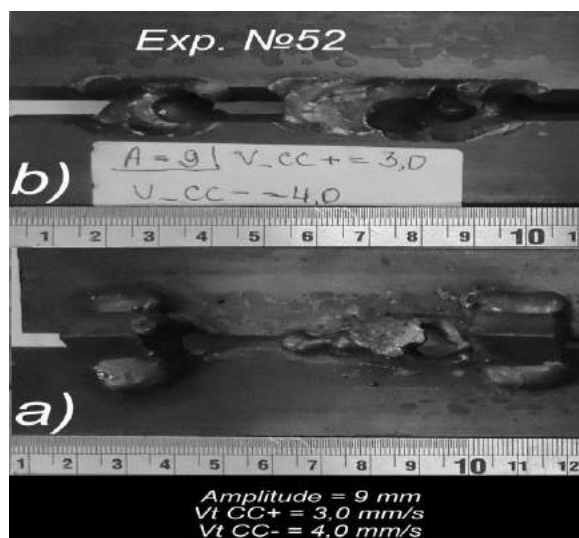


Figura 4.20 – Aspecto do cordão do Experimento 52 com MIG/MAG com técnica *Switch-back* (curso de 10 mm), com polaridade CC+ nas laterais e CC- no meio da junta: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

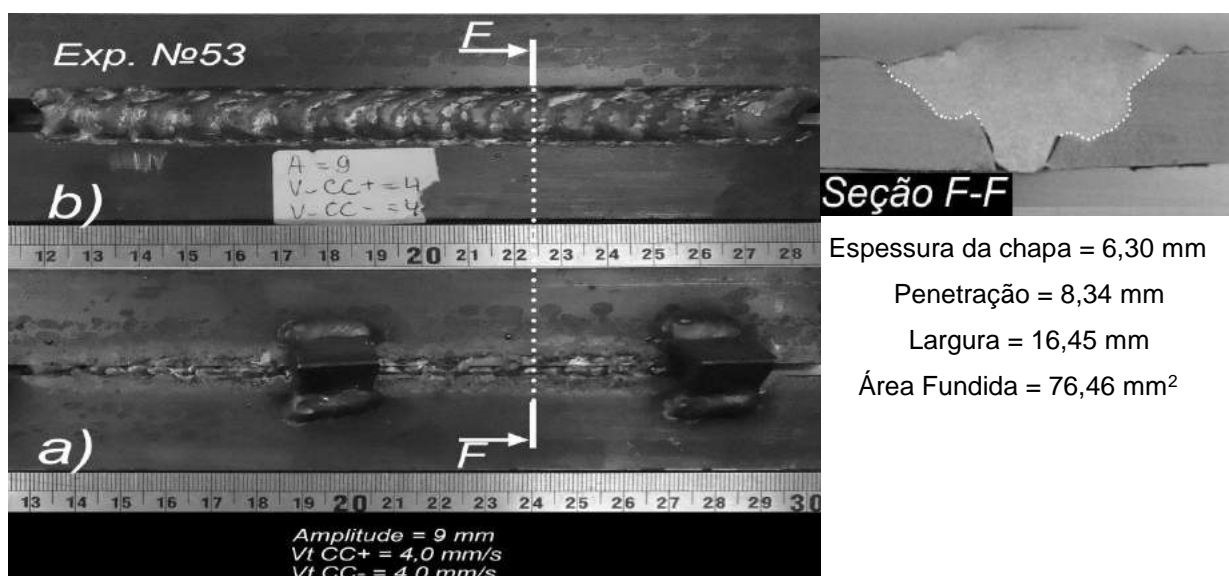


Figura 4.21 – Aspecto do cordão do Experimento 53 com MIG/MAG com técnica *Switch-back* (curso de 10 mm), com polaridade CC+ nas laterais e CC- no meio da junta: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

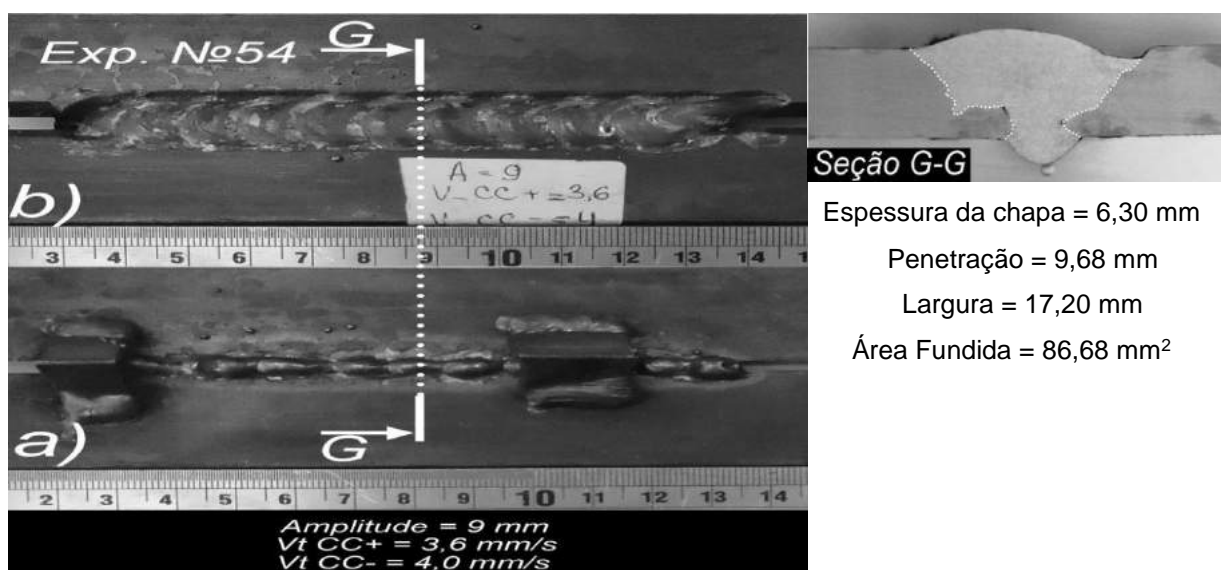


Figura 4.22 – Aspecto do cordão do Experimento 54 com MIG/MAG com técnica *Switch-back* (curso de 10 mm), com polaridade CC+ nas laterais e CC- no meio da junta: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

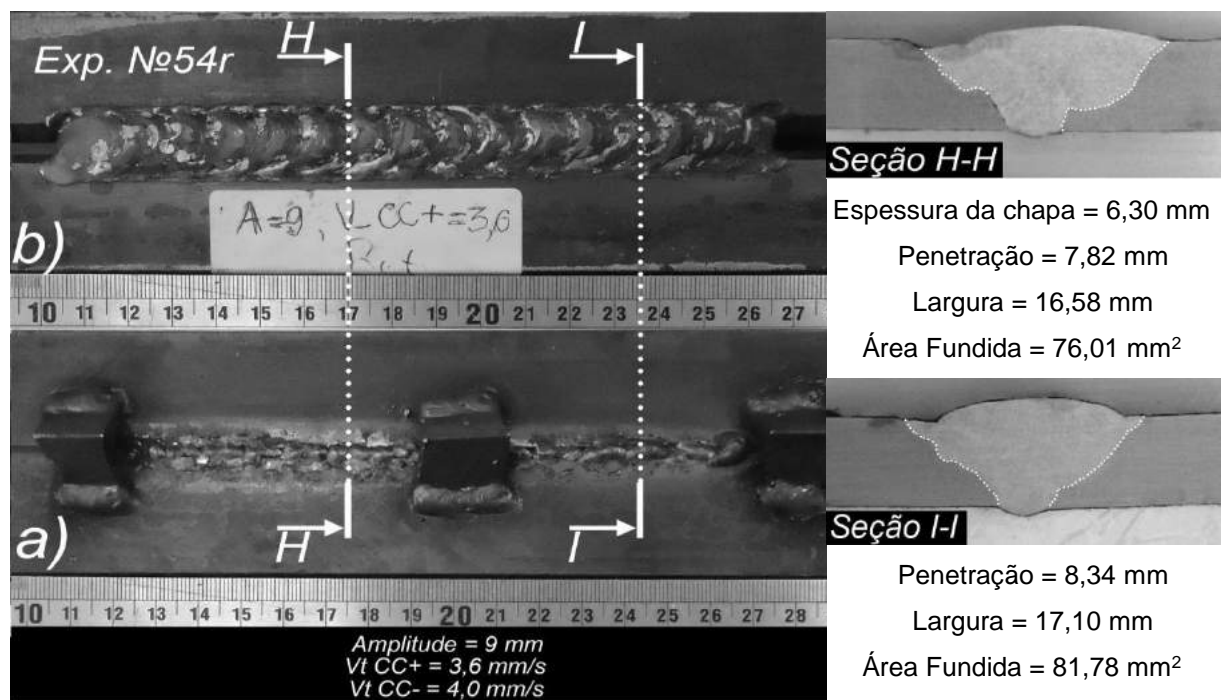


Figura 4.23 – Aspecto do cordão do Experimento 54r (réplica) com MIG/MAG com técnica *Switch-back* (curso de 10 mm), com polaridade CC+ nas laterais e CC- no meio da junta: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da direita para esquerda)

O Experimento 52 com a velocidade nas laterais de 3 mm/s e a amplitude constante de 9 mm resultou em perfuração do cordão, como mostra a Figura 4.20. Esse teste mostrou que para esse tipo de junta não parece ser adequado utilizar velocidade nas laterais menores ou iguais a 3 mm/s, pois velocidade muito baixas nas laterais, consequentemente baixas velocidades equivalentes de soldagem, fornecem muito calor imposto e metal de adição, favorecendo a formação de poças de fusão “grandes” e “quentes” para esse tipo de junta.

No Experimento 53, as velocidades nas laterais e no meio da junta foram mantidas em 4 mm/s. A Figura 4.21 mostra que, neste caso, não houve perfuração mas o acabamento da face de raiz dos cordões ficou prejudicado; percebe-se falta de fusão nas paredes dos chanfros (Seção F-F da Figura 4.21). Entretanto, a velocidade da tocha nas laterais igual a 3 mm/s (Experimento 52) provocou perfuração do cordão e a velocidade nas laterais igual a 4 mm/s (Experimento 53) causou falta de fusão e não houve bom acabamento da face de raiz. Assim, parece que a velocidade nas laterais adequada para esse tipo da junta está entre 3 e 4 mm/s.

Dessa forma, foi utilizada uma velocidade intermediária (3,6 mm/s) para os Experimentos 54 e 54r (réplica). A Figura 4.22 mostra um cordão com bom acabamento e pequeno reforço na face de raiz, o que é aceitável pelos critérios de aceitabilidade

estabelecidos no início deste item. Todavia, a seção transversal G-G desse cordão mostra pequenas faltas de fusão nas paredes do chanfro da junta. O Experimento 54 foi repetido no Experimento 54r (replica) e, como mostra a Figura 4.23, principalmente na face de raiz, o cordão neste caso não exibiu reforço na face de raiz como o cordão do Experimento 54. As Seções transversais H-H e I-I da Figura 4.23 não demonstram falta de fusão comparado com a seção transversal G-G da Figura 4.22.

Assim, essa etapa demonstrou que a redução da velocidade da tocha nas laterais da junta, conseqüentemente da velocidade de soldagem equivalente, foi capaz de reduzir um pouco o problema de falta de fusão outrora verificado, mas diminuindo a produtividade do processo de soldagem e sem mostrar boa repetibilidade.

4.7 – Otimização paramétrica para controle da falta de fusão na raiz do cordão com abertura de raiz (folga) de 4 mm

Em virtude da recorrente falta de fusão nas paredes da juntas que ocorreu em quase todos os cordões soldados pelo processo MIG/MAG com reversão sincronizada de sentido e polaridade, buscou-se resolver (controlar) este defeito por uma série de experimentos.

4.7.1 – Influência do aumento da corrente média nas laterais da junta (CC+) e troca do gás de proteção

Para tentar resolver o problema relacionado com a falta de fusão, foi decidido alterar dois parâmetros. O primeiro é o gás de proteção, que foi mudado para a mistura Ar+8%CO₂ (Ar+10%CO₂), que é mais “quente”. A vazão adotada durante as soldagens foi de 15 l/min. Antes de cada soldagem, a vazão foi confirmada por intermédio de um fluxômetro (bibímetro). O segundo parâmetro alterado foi a corrente média no MIG/MAG Pulsado (CC+), que no caso foi aumentada de 100 para 130 A, visando uma maior diferença entre a energia imposta em cada condição. Para essa nova condição, uma série de experimentos foi feita visando encontrar os parâmetros que levassem à condição UGPP para CC+, resumidamente apresentados na Tabela 4.10. Ao mudar o gás de proteção, foi necessário aumentar o valor de corrente de pulso (Ip) de 250 A para 270 A, prevendo que a corrente de transição com o gás Ar+8%CO₂ (Ar+10%CO₂) seria maior. Em consequência, foi requerido um maior tempo de pulso (tp), passando de 7,7 ms para 9,6 ms, para se alcançar a condição de UGPP. Para se chegar a corrente média desejada na polaridade positiva (Im+), o tempo de base (tb) passou para 14,9 ms (anteriormente 19,3 ms), mantendo-se a mesma corrente de base de 40 A. A velocidade de alimentação para cada teste foi ajustada para se manter um comprimento de arco de aproximadamente 4 a 5 mm (visualmente). Manteve-se

invariáveis durante os testes uma DBCP (distância bico de contato-peça) de 22 mm, uma V_s (velocidade de soldagem) igual a 5 mm/s. O arame utilizado foi da classe AWS ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro.

A Figura 4.24 ilustra um oscilograma típico da soldagem (sinais de corrente e do sinal de luminosidade) com os novos parâmetros, evidenciando UGPP (uma gora por pulso). Para a corrente na polaridade negativa não houve mudança em relação a etapa anterior, ficando no modo corrente contínua com corrente média (I_m -) de 72 A e velocidade de alimentação de 2,8 m/min.

Tabela 4.10 – Parâmetros de regulagem para a soldagem MIG/MAG Pulsado na polaridade positiva (CC+) com DBCP de 22 mm, Ar+8%CO₂ (Ar+10%CO₂) e arame-eletrodo AWS ER70S-6 de 1,2 mm

I_m (A)	I_p (A)	I_b (A)	t_p (ms)	t_b (ms)	$Valim$ (m/min)	f_p (Hz)
130	270	40	9,6	14,9	3,5	40,8

Onde, I_m = corrente média (A); I_p = corrente de pulso (A); I_b = corrente de base (A); t_p = tempo de pulso (ms); t_b = tempo de base (ms); $Valim$ = velocidade de alimentação (m/min); f_p = frequência de pulsos (Hz)

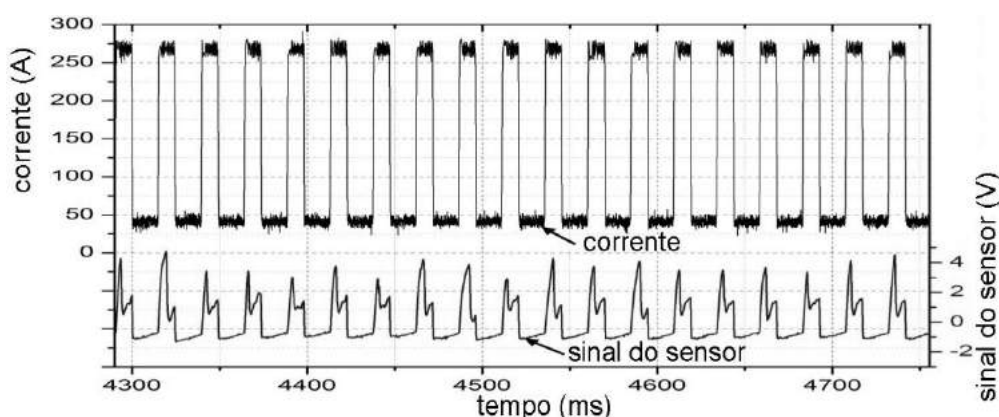


Figura 4.24 – Oscilogramas da corrente de soldagem e do sinal do sensor de luminosidade (para verificar a transferência das gotas) em MIG/MAG Pulsado convencional

A Tabela 4.11 mostra a combinação de parâmetros de soldagem usados nesta etapa. Com o aumento da corrente média em CC+ (I_m +) para 130 A, a velocidade de alimentação ($Valim$ +) foi aumentada, passando de 2,8 para 3,5 m/min. Desta forma, nesta fase foi experimentada uma variação da velocidade de soldagem no curso positivo ($VtCC$ +), procurando-se encontrar também um volume adequado da poça por este efeito. Deve-se lembrar que na etapa anterior foi utilizada com sucesso uma $VtCC$ + de 3,6 mm/s e uma velocidade de soldagem no curso negativo ($VtCC$ -) de 4,0 mm/s, mas com uma corrente média de 100 A e gás de proteção Ar+5%O₂. Assim, o primeiro no caso

Experimento 55 partiu destas mesmas velocidades com os novos parâmetros para a corrente média de 130 A e Ar+8%CO₂ (Ar+10%CO₂) como gás de proteção. A Figura 4.25 mostra o sinal de corrente com alternância das polaridades. A visualização das soldas é apresentada no Apêndice V.

Tabela 4.11 – Parâmetros de soldagem para experimentos variando a amplitude de movimento transversal e a velocidade de soldagem em polaridade positiva (CC+)

Nº exp.	A (mm)	VtCC+ (mm/s)	VtCC- (mm/s)	Veq (mm/s)	tempo CC+/tempo CC- por curso (s) ou (%)
55	9	3,6	4,0	0,93	5,55/2,50 (69/31)
56		4,0	4,0	1,01	5,00/2,50 (66/34)
57		5,2	4,0	1,21	3,85/2,50 (60/40)
59		7,0	4,0	1,46	2,85/2,50 (53/47)
60		7,5	4,0	1,52	2,66/2,50 (52/48)
58		8,0	4,0	1,58	2,50/2,50 (50/50)
61	8	7,5	4,0	1,55	2,66/2,50 (52/48)
63		8,75	4,0	1,69	2,28/2,50 (48/52)
62		10,0	4,0	1,82	2,00/2,50 (44/56)

Obs 1 (parâmetros variáveis): A = amplitude transversal de movimento transversal da tocha (mm); VtCC+ = velocidade da tocha nas laterais da junta (mm/s); VtCC- = velocidade da tocha no meio da junta (mm/s); Veq = velocidade equivalente de soldagem (mm/s)

Obs 2 (parâmetros invariáveis): Polaridade positiva (CC+): Ip = corrente de pulso igual a 270 A; tp = tempo de pulso igual a 9,6 ms; Ib = corrente de base igual a 40 A; tb = tempo de base igual a 14,9 ms; Im+ = corrente média na polaridade positiva igual a 130 A; Valim+ = velocidade de alimentação no modo de programa na polaridade positiva (CC+) igual a 3,5 m/min; Polaridade negativa (CC-): Im- = corrente média na polaridade negativa (CC-) igual a -72 A; Valim- = velocidade de alimentação no modo de programa na polaridade negativa (CC-) igual a 2,8 m/min; DBCP = distância bico de contato peça igual a 22 mm

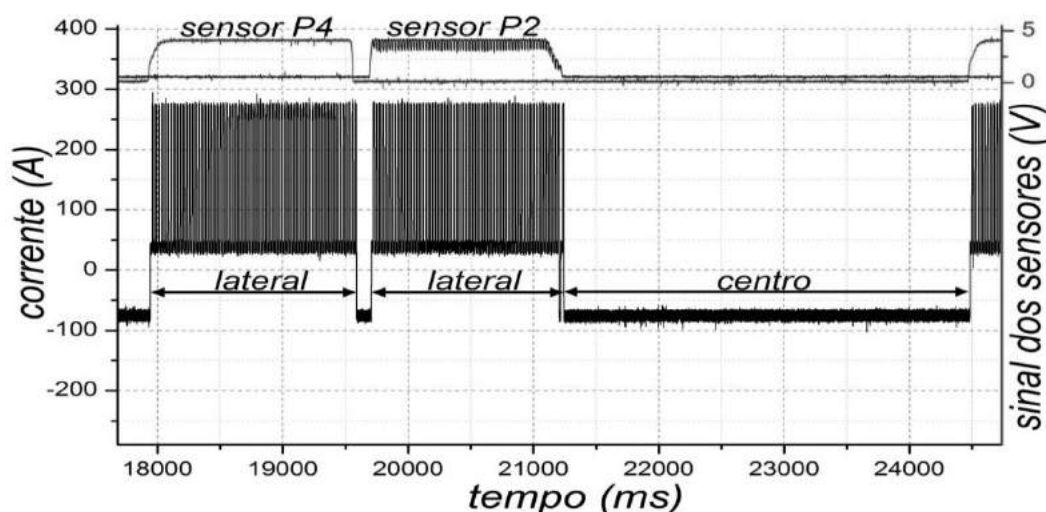


Figura 4.25 – Sinais de corrente de soldagem e tensão dos sensores do sistema de monitoramento da tocha do Experimento 60 (típico de todos os testes desta etapa)

Como dito anteriormente, no Experimento 55, com os parâmetros de velocidade de movimento da tocha (V_{tCC+}) igual a 3,6 mm/s e amplitude de 9 mm, usou-se as mesmas regulagens de velocidades de uma boa condição da etapa anterior ($I_m = 100$ A e gás de proteção Ar+ 5%O₂), mas com novo valor de corrente média na polaridade CC+ igual a 130 A e gás de proteção Ar+8%CO₂ (Ar+10%CO₂). Devido à maior energia imposta e ao uso de uma gás mais “quente”, houve perfuração na raiz (Figura A5.1, Apêndice V). Para reduzir a concentração da energia em forma de calor, foram feitos os Experimentos 56 e 57 (Figura A5.1, Apêndice V), nos quais foi-se aumentando a V_{tCC+} até se atingir uma condição mais estável de poça capaz de levar a um cordão em conformidade de acordo com os critérios de aceitabilidade para os passes de raiz (Item 4.6).

Resumindo os resultados desta etapa, pode-se falar que a velocidade de soldagem (e/ou volume da poça de fusão) nas laterais da junta V_{tCC+} influencia na penetração e fusão dos chanfros. Por exemplo, quando foi aumentada a velocidade V_{tCC+} com uma amplitude constante, diminuiu-se a penetração (menos energia de soldagem por unidade de comprimento da solda). Pelos experimentos, foi encontrada uma velocidade V_{tCC+} adequada para esta junta com valor de 7,5 mm/s (Experimento 60 que apresenta a Figura A5.4, Apêndice V). Destaca-se que com V_{tCC+} maior, gerou-se falta de fusão e baixa penetração na raiz (Experimento 58 da Figura A5.2, Apêndice V), enquanto uma menor velocidade (Experimento 59, Figura A5.3, Apêndice V) mostrou excesso de reforço na face de raiz. Ou seja, uma pequena mudança da V_{tCC+} de 0,5 mm/s pode mudar radicalmente a qualidade do cordão de solda.

Para estudar o efeito de mudança da amplitude de movimento da tocha, foi diminuindo o seu valor de 9 para 8 mm. O Experimento 61 (Figura A5.5, Apêndice V) tem velocidade adequada para 9 mm igual a 7,5 mm/s, mas com a amplitude de 8 mm o cordão apresentou perfurações nesta velocidade. Acredita-se que se for diminuir a amplitude de movimento da tocha, o calor concentra mais e ao mesmo tempo agindo sobre uma menor espessura (ângulo do chanfro igual a 30 graus), acontecendo a perfuração. Assim, para encontrar a V_{tCC+} adequada para a amplitude de 8 mm, foi feito uma série de experimentos, encontrando-se o melhor valor para V_{tCC+} como 8,75 mm/s (Experimento 63 da Figura A5.7, Apêndice V). Entretanto, mesmo assim, no começo da solda a raiz do cordão tem bom acabamento e sem falta de fusão no começo da solda (Seção Q-Q), mas em outra Seção R-R que é pelo menos fim de solda passou a existir uma falta de fusão.

Para encontrar mais parâmetros que influenciam a falta de fusão e acabamento dos cordões, foi definido nesse trabalho um índice, denominado de Fator Energético (FE), como a razão entre a corrente média ponderada de soldagem nas duas polaridades e a velocidade equivalente de soldagem (V_{eq}). Sabe-se que a maior parcela de calor que passa para chapa advém da intensidade e densidade da corrente. Uma outra parcela de calor que

passa para chapa seria o calor relativo à entalpia do plasma, normalmente proporcional à tensão. Porém, como o gás de proteção é o mesmo, preferiu-se aplicar o conceito de Fator Energético, a fim de minimizar erros. Deve-se destacar que no caso desse trabalho, a mudança de polaridade para negativa (CC-) faz a tensão ficar maior, apesar de que o calor imposto na chapa para uma mesma corrente é esperada ser menor (o que não permitiria usar a energia de soldagem convencional para esse caso). Fator Energético ponderado de soldagem (FEp) é uma definição da energia que leve em conta o curso de soldagem MIG/MAG com reversão sincronizada de sentido e polaridade (*Switch-back*), cujo cálculo é dado pela Equação 4.6.

$$FEp = \left(\frac{(Im+ * t+) + (|Im-| * t-)}{Veq} \right) \quad (4.6)$$

onde FEp = Fator Energético ponderado de soldagem (A/mm), Im+ = corrente média na polaridade CC+ (A), t+ = porcentagem do tempo de funcionamento do programa na polaridade CC+ por ciclo (curso) da trajetória de soldagem *Switch-back* (%), Im- = corrente média na polaridade CC- (A), t- = porcentagem do tempo de funcionamento do programa na polaridade CC- por ciclo (curso) da trajetória de soldagem *Switch-back* (%), Veq = velocidade equivalente de soldagem (mm/s).

Para calcular o volume unitário depositado, como fator que pode influenciar na qualidade de acabamento do cordão de solda pelo processo MIG/MAG reversão sincronizada de sentido e polaridade, foi criada a Equação 4.7.

$$Vud = \left(\frac{((Valim+ * t+) + (Valim- * t-)) * Sa}{Veq} \right) * C \quad (4.7)$$

onde Vud = volume unitário depositado do arame-eletrodo (mm³), Val+ = velocidade média de alimentação do arame-elétrodo na polaridade CC+ (mm/s), t+ = porcentagem do tempo de funcionamento do programa na polaridade CC+ por ciclo (curso) (%), Val- = velocidade média de alimentação do arame-eletrodo na polaridade CC- (mm/s), t- = porcentagem do tempo de funcionamento do programa na polaridade CC- por ciclo (curso) (%), Sa = área da secção transversal do arame-eletrodo (igual a 1,13 mm² para o arame-eletrodo de 1,2 mm de diâmetro), Veq = velocidade equivalente de soldagem (mm/s), C = comprimento do cordão de solda (igual a 1 mm).

Também foi calculada, pela Equação 4.8, a velocidade de alimentação aparente, definida dentro de um curso de soldagem MIG/MAG com reversão sincronizada de sentido e polaridade (*Switch-back*).

$$\text{Valimap} = (\text{Valim} + * t +) + (\text{Valim} - * t -) \quad (4.8)$$

onde Valimap = velocidade de alimentação aparente (m/min), Valim+ = velocidade média de alimentação do arame-eletrodo na polaridade CC+ (mm/s), t+ = porcentagem do tempo de funcionamento do programa na polaridade CC+ por ciclo (curso) (%), Valim- = velocidade média de alimentação do arame-eletrodo na polaridade CC- (mm/s), t- = porcentagem do tempo de funcionamento do programa na polaridade CC- por ciclo (curso) (%).

A Tabela 4.12 apresenta os cálculos do Fator Energético ponderado (FEp), volume unitário depositado (Vud) do arame-eletrodo, velocidade de alimentação aparente (Valimap), que foram feitos para as melhores condições encontradas na etapa anterior (para a corrente média na polaridade CC+ de 100 A) e nesta etapa (com corrente média na polaridade CC+ de 130 A).

Tabela 4.12 – Parâmetros de soldagem dos experimentos com diferentes correntes médias e gases de proteção em CC+ (folga da raiz de 4 mm e amplitude de 9 mm)

Nº exp.	Im+ (A)	Veq (mm/s)	Valimap (m/min)	FEp (A/mm)	Área fundida (mm ²)	Vud (mm ³)	tempo CC+/tempo CC- por ciclo (s) ou (%)	Situação do cordão
52	100	0,81	2,80	84,90	-	65,20	6,67/2,50 (73/27)	Com perfurações
54	100	0,93	2,80	62,20	86,68	56,72	5,55/2,50 (60/40)	Sem falta de fusão
53	100	1,01	2,80	52,10	76,46	52,50	5,00/2,50 (67/33)	Com falta de fusão
55	130	0,93	3,28	80,10	-	66,5	5,56/2,50 (69/31)	Com perfurações
56	130	1,01	3,27	67,10	-	61,2	5,00/2,50 (67/33)	Com perfurações
57	130	1,21	3,22	43,70	-	50,3	3,85/2,50 (61/39)	Com perfurações
59	130	1,46	3,17	27,70	53,39	40,9	2,86/2,50 (53/47)	Sem falta de fusão
60	130	1,52	3,16	25,10	61,02	39,21	2,67/2,50 (52/48)	Sem falta de fusão
58	130	1,58	3,15	22,80	55,30	37,5	2,50/2,50 (50/50)	Com falta de fusão

Onde, Im+ = corrente média na polaridade CC+ (A); Veq = velocidade equivalente de soldagem (mm/s); Valimap = velocidade de alimentação aparente (m/min); FEp = fator energético ponderado

(A/mm); Vud = volume unitário depositado do arame-eletrodo (mm^3); gás de proteção para $Im+$ de 100 A = $\text{Ar}+5\%\text{O}_2$ e para $Im+$ de 130 A = $\text{Ar}+8\%\text{CO}_2$ ($\text{Ar}+10\%\text{CO}_2$)

A Figura 4.26 resume de forma geral os resultados obtidos nesta etapa do trabalho mostrando um mapa de operação tentando identificar as regiões adequadas para soldagem (com qualidade do cordão) para parâmetros da Tabela 4.11 e Tabela 4.9.

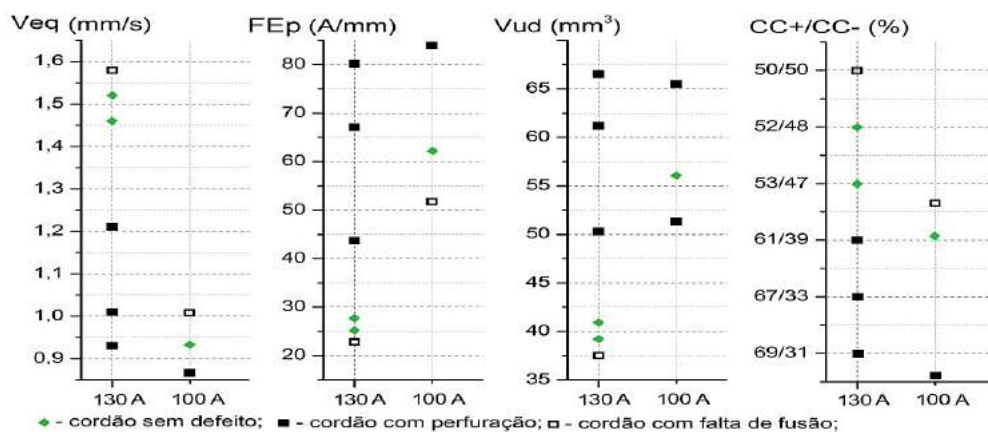


Figura 4.26 – Mapa de qualidade dos cordões em função da velocidade equivalente de soldagem (V_{eq}), Fator Energético ponderado (FE_p), volume unitário depositado (V_{ud}) e porcentagem de funcionamento do programa por ciclo de solda ($CC+/CC-$) para dois níveis de corrente média (100 e 130 A)

Analisando a Figura 4.26, pode-se perceber que existe uma faixa adequada para a relação entre os tempos em cada polaridade (tempo em $CC+$ /tempo em $CC-$) por curso da trajetória do *Switch-back*. Assim, para a corrente de 130 A ($\text{Ar}+8\%\text{CO}_2$ ($\text{Ar}+10\%\text{CO}_2$)), a relação adequada de capacidade de fusão do processo (aporte de calor) em cada polaridade fica em torno de 51/49 ($CC+/CC-$). Já para a corrente de 100 A ($\text{Ar}+5\%\text{O}_2$), este balanço de calor fica em torno de 60/40 ($CC+/CC-$). Como esperado, para ambos os níveis de corrente, quando a relação pressupõe maiores porcentagens de tempo na polaridade $CC+$ (maior aporte de calor), a tendência é que ocorram perfurações no cordão de solda, como verificado. Por outro lado, se a porcentagem do tempo em $CC+$ fica menor do que faixa adequada, a tendência é ocorrer falta de fusão, como mostrado. A porcentagem de tempo em polaridade $CC+$ capaz de produzir cordões sem defeitos foi menor no caso da corrente de 130 A, pois neste caso, além de uma maior corrente média de soldagem, utilizou-se um gás de proteção sabidamente de maior poder de fusão ($\text{Ar}+8\%\text{CO}_2$ ($\text{Ar}+10\%\text{CO}_2$)); quanto maior a capacidade de fusão do arco, maior o tempo necessário em polaridade $CC-$ (menor aporte de calor). Para as relações de tempo de polaridade e demais condições de soldagem utilizadas, mostra-se quais as faixas de velocidade equivalente consequentemente adequadas; em torno de 1,5 mm/s para 130 A e 0,93 para 100 A. Da

mesma forma, mostra-se as faixas de Fator Energético ponderada adequada; valores altos de energia causam perfurações e valores baixos provocam falta de fusão. Por fim, para as condições utilizadas, indica-se as faixas de volume unitário depositado apropriados. Para ambos os níveis de corrente, cordões de grande volume (poças de fusão muito grandes) dificultam controlar a formação adequada do cordão, tanto por grandes quantidades de calor imposto, consequência de grandes volumes de poça, tanto por dificuldades em manter um balanço de forças adequado (poças de maior volume aumentam a força devido à gravidade, tendendo a facilitar o escorrimento e perfuração do cordão de solda).

4.7.2 – Influência do curso da trajetória do Switch-back sobre a formação do cordão de solda para uma abertura de raiz (folga) de 4 mm

Nessa etapa foram feitos experimentos nos quais o foco principal foi o curso do *Switch-back*, como mostra a Figura 4.27. O objetivo foi entender como o curso desta técnica influencia na formação e acabamento (face superior e inferior da raiz) do cordão de solda, e ao mesmo tempo tentar resolver o problema de falta de fusão recorrente nos cordões de solda. As placas de teste foram preparadas com a folga de 4 mm e a amplitude de movimento da tocha (L2 da Figura 4.27) utilizada foi de 9 mm.

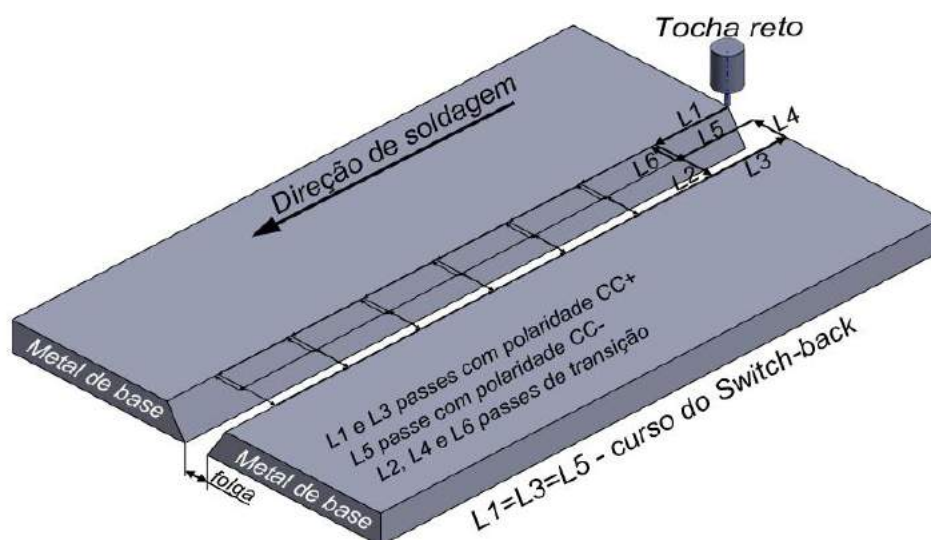


Figura 4.27 – Trajetória da técnica *Switch-back* utilizada

A Tabela 4.13 mostra os parâmetros principais dos cordões que foram feitos. A velocidade da tocha e os tempos em CC+ e CC- por curso foram programados de acordo com os melhores resultados obtidos na sub-etapa anterior (Item 4.6). Foram escolhidos três cursos para avaliação (L1, L3 e L5 da Figura 4.27, respectivamente 5; 7,5 e 10 mm). Dependendo do curso, a velocidade equivalente de soldagem é modificada. A Figura 4.28

mostra os sinais das correntes de soldagem em função da mudança do valor do curso utilizado. A visualização das soldas é apresentada no Apêndice VI.

Tabela 4.13 – Sequência dos testes de soldagem para estudo da influência do curso do *Switch-back* nas placas de testes com folga de 4 mm

Nº exp.	A (mm)	Curso do <i>Switch-back</i> (mm)	VtCC+ (mm/s)	VtCC- (mm/s)	Veq (mm/s)	tempo CC+/tempo CC- por ciclo (s) ou (%)
64	9	5	7,5	4,0	1,26	1,33/1,25 (52/48)
65		7,5	7,5	4,0	1,42	2,00/1,88 (52/48)
60r		10	7,5	4,0	1,52	2,66/2,50 (52/48)

Obs 1 (parâmetros variáveis): A = amplitude transversal de movimento transversal da tocha (mm); VtCC+ = velocidade da tocha nas laterais da junta (mm/s); VtCC- = velocidade da tocha no meio da junta (mm/s); Veq = velocidade equivalente de soldagem (mm/s)

Obs 2 (parâmetros invariáveis): Polaridade positiva (CC+): I_p = corrente de pulso igual a 270 A; t_p = tempo de pulso igual a 9,6 ms; I_b = corrente de base igual a 40 A; t_b = tempo de base igual a 14,9 ms; I_m+ = corrente média na polaridade positiva igual a 130 A; $Valim+$ = velocidade de alimentação no modo de programa na polaridade positiva (CC+) igual a 3,5 m/min; Polaridade negativa (CC-): I_m- = corrente média na polaridade negativa (CC-) igual a -72 A; $Valim-$ = velocidade de alimentação no modo de programa na polaridade negativa (CC-) igual a 2,8 m/min; DBCP = distância bico de contato peça igual a 22 mm

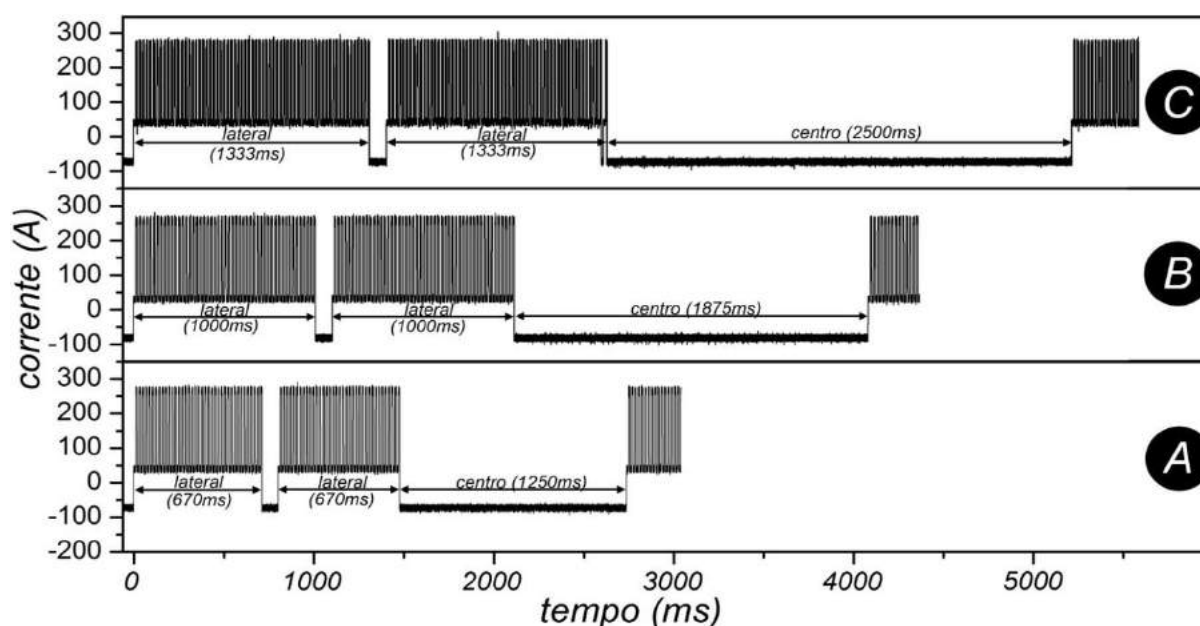


Figura 4.28 – Comparação dos sinais das correntes de soldagem entre os Experimentos 64 (A) (curso de 5 mm), 65 (B) (curso de 7,5 mm) e 60r (C) (curso de 10 mm)

De maneira geral, quando menor o valor do curso, para uma dada velocidade da tocha, menor é o tempo de funcionamento em cada polaridade por ciclo (ocorre uma troca de polaridade mais frequentemente) e o ciclo total é menor.

Os resultados dos Experimentos 64 e 65 (Figuras A6.1 e A6.2, Apêndice VI) mostram que com as velocidades equivalentes (V_{eq}) baixas, cursos menores do que 10 mm

provocam perfurações, provavelmente por causa da maior energia de soldagem concentrada e/ou maior poça de fusão formada. Para os Experimentos 64 e 65 não foram feitas macrografias em virtude dos cordões já serem rejeitados por ocorrência de perfurações. O Experimento 60r (réplica do Experimento 60) mostrou repetibilidade (Figuras A6.3, Apêndice VI); o cordão visualmente foi similar ao original. Entretanto, no Experimento 60r foi encontrada falta de fusão, indicando falta de robustez.

Para verificar como o curso do *Switch-back* influencia o acabamento do cordão de solda para uma mesma velocidade equivalente, foram feitos alguns experimentos. Como mostra a Tabela 4.14, a velocidade equivalente foi programada em 1,52 mm/s e a relação dos tempos em CC+ e CC- em 52%/48% por ciclo (melhor condição obtida anteriormente). A amplitude de movimento da tocha utilizada foi de 9 mm. A visualização das soldas é apresentada no Apêndice VII.

Tabela 4.14 – Parâmetros de soldagem para experimentos variando o curso do *Switch-back* com a velocidade equivalente constante

Nº exp.	A (mm)	VtCC+ (mm/s)	VtCC- (mm/s)	Curso do <i>Switch-back</i> (mm)	Veq (mm/s)	tempo CC+/tempo CC- por ciclo (s) ou (%)
66	9	9,2	4,9	5	1,52	1,87/1,74 (52/48)
67*		8	4,3	7,5	1,52	2,00/1,88 (52/48)

Onde, A = amplitude movimento transversal da tocha (mm); VtCC+ = velocidade da tocha na polaridade CC+ (mm/s); VtCC- = velocidade da tocha na polaridade CC- (mm/s); Veq = velocidade equivalente de soldagem (mm/s); * foi feita uma réplica para este experimento

A partir desses experimentos, foi percebido que o curso do *Switch-back* tem influência sobre o tamanho da poça de fusão; quando menor o curso, para uma dada velocidade equivalente e uma relação de tempos em CC+ e CC- por curso, maior é a poça de fusão (mais quente fica a junta); para cursos longos a poça de fusão tem mais tempo para solidificar. A Figura 4.29 mostra esquematicamente a face de raiz para cursos de 5, 7,5 e 10 mm. Com 5 mm de curso os “elos” da face de raiz ficam muito próximos uns dos outros e se juntam; por isso no cordão com curso de 5 mm fica difícil perceber esses “elos”. O acabamento dos cordões com menor curso fica mais liso, o que pode facilitar soldar os passes de enchimento ou acabamento. Avaliando os cursos de 7,5 e 10 mm pode ser concluído que o curso tem influência no tamanho dos “elos” da face de raiz do cordão e ao mesmo tempo no acabamento de cordão; com maior curso os “elos” aparecem maiores e menos juntos.

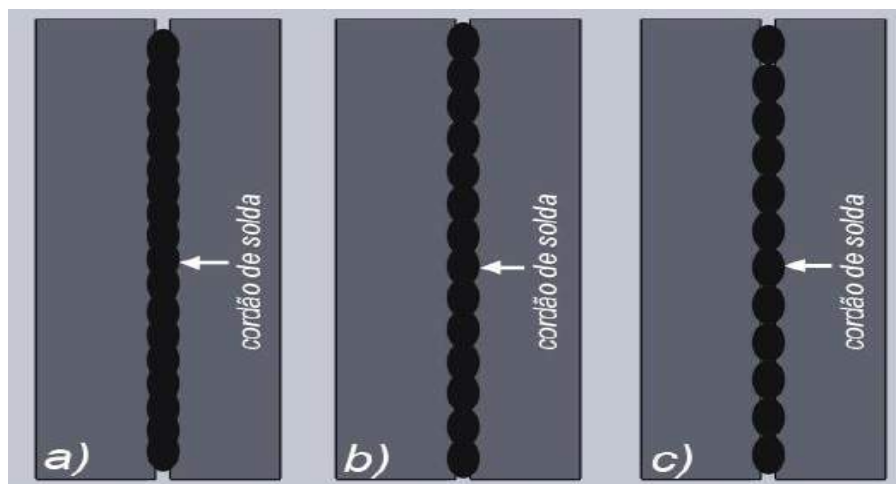


Figura 4.29 – Esquema das faces de raízes de cordões com cursos de 5 (a), 7,5 (b) e 10 (c) mm

Para tentar resolver o problema de falta de fusão e conseguir soldar sem grandes elos (que provavelmente dão este defeito) tem-se duas possibilidades; primeiro soldar com curso de 7,5 mm e aumentar a velocidade da tocha na polaridade CC- para manter a poça de fusão mais “quente”, e segundo fazer mudança nos parâmetros do Experimento 66 (Figura A7.1, Apêndice VII) como tentativa de aumentar a velocidade V_{tCC+} para não concentrar o calor e evitar perfurações e obter cordões com bom acabamento na face de raiz.

4.7.3 – Influência do aumento da velocidade equivalente mantendo a porcentagem dos tempos em cada polaridade constante no ciclo de solda

Nessa etapa foram feitos os experimentos, onde o foco principal foi estudar como a velocidade equivalente (V_{eq}) influencia o cordão de solda quando a porcentagem do tempo em cada polaridade fica constante no ciclo de solda. A Tabela 4.15 mostra os parâmetros principais dos cordões que foram feitos nesta etapa. A visualização das soldas é apresentada no Apêndice VIII.

Tabela 4.15 – Sequência dos testes de soldagem para estudo da influência da velocidade equivalente de soldagem do *Switch-back*

Nº exp.	FEP (A/mm)	Vud (mm ³)	VtCC+ (mm/s)	VtCC- (mm/s)	Veq (mm/s)	tempo CC+/tempo CC- por ciclo (s) ou (%)
71	145,1	36,4	7,9	9,2	1,85	1,90/1,82 (70/30)
76	113,8	32,2	9,0	10,5	2,09	1,67/0,71 (70/30)
75	103,1	30,6	9,5	11,0	2,20	1,58/0,68 (70/30)

73	94,0	29,2	10,0	11,5	2,31	1,50/0,65 (70/30)
74	67,2	24,6	12,0	14,0	2,74	1,25/0,54 (70/30)

Obs 1 (parâmetros variáveis): FE_p = fator energético ponderado (A/mm); Vud = volume unitário depositado (mm^3); $VtCC+$ = velocidade da tocha nas laterais da junta (mm/s); $VtCC-$ = velocidade da tocha no meio da junta (mm/s); Ve_q = velocidade equivalente de soldagem (mm/s);

Obs 2 (parâmetros invariáveis): A = amplitude transversal de movimento da tocha igual a 9 mm; curso do Switch-back igual a 7,5 mm; $Valim+$ = velocidade de alimentação na polaridade CC+ igual a 3,7 m/min; $Valim-$ = velocidade de alimentação na polaridade CC- igual a 3,3 m/min; $Valimap$ = velocidade de alimentação aparente ponderada igual a 3,6 m/min; Polaridade positiva (CC+): I_p = corrente de pulso igual a 270 A; t_p = tempo de pulso igual a 9,6 ms; I_b = corrente de base igual a 40 A; t_b = tempo de base igual a 14,9 ms; I_{m+} = corrente média na polaridade positiva igual a 130 A; Polaridade negativa (CC-): I_{m-} = corrente média na polaridade negativa (CC-) igual a -72 A; $DBCP$ = distância bico de contato peça igual a 22 mm; gás de proteção $Ar+8\%CO_2$ ($Ar+10\%CO_2$)

Como mostraram os testes desta etapa, o processo dependente da velocidade de soldagem. No início desta série de experimentos aconteceram perfurações, provavelmente por causa do tamanho excessivo da poça em função de baixas velocidades de soldagem (quanto menor a velocidade, maior a poça de fusão e mais difícil controlá-la devido à grande quantidade de calor adicionado e elevada força devida à gravidade, como mostra o Experimento 71 da Figura A8.1, Apêndice VIII com Ve_q igual a 1,85). O Experimento 76 (Figura A8.2, Apêndice VIII) com velocidade equivalente de soldagem de 2,09 mm/s mostrou melhor resultado. No início o cordão é bem regular na raiz e na face, mas com perfuração no final. Quando a velocidade equivalente de soldagem alcançou 2,31 mm/s (Experimento 73 da Figura A8.4, Apêndice VIII), o cordão de solda ficou bem regular na raiz e face e sem falta de fusão, como mostram as Seções transversais M-M e K-K da Figura 4.58. No Experimento 74, no qual a velocidade equivalente foi aumentada para 2,74 mm/s, o cordão resultante (Figura A8.5, Apêndice VIII) mostrou falta de metal depositado.

Assim, para as condições de soldagem utilizadas, com a porcentagem dos tempos em cada polaridade constante, foi verificado que a velocidade equivalente de soldagem de 2,31 mm/s se mostrou adequada (produziu cordões de boa qualidade). Além disso, o processo de soldagem se mostra bem sensível a pequenas mudanças na velocidade equivalente de soldagem.

4.7.4 – Influência do aumento da velocidade equivalente mantendo a Fator Energético ponderado constante no ciclo de solda

Nesta etapa foi verificada a influência da Fator Energético ponderada no cordão de solda tomando-se como base a energia do Experimento 73 (Tabela 4.15), que apresentou os melhores resultados de qualidade do cordão. A Tabela 4.16 mostra os parâmetros de soldagem utilizados nesta etapa. A visualização do cordão de solda é apresentado na Figura A8.6, Apêndice VIII.

Tabela 4.16 – Experimentos de soldagem para verificação da influência da Fator Energético ponderado do *Switch-back*

Nº exp.	FEP (A/mm)	Vud (mm ³)	VtCC+ (mm/s)	VtCC- (mm/s)	Veq (mm/s)	tempo CC+/tempo CC- por ciclo (s) ou (%)
73*	94,0	29,2	10,0	11,5	2,31	1,50/0,65 (70/30)
78	93,9	28,8	9,5	16,5	2,36	1,58/0,45 (78/22)

Obs 1: FEP = fator energético ponderado (A/mm); Vud = volume unitário depositado (mm³); VtCC+ = velocidade da tocha nas laterais da junta (mm/s); VtCC- = velocidade da tocha no meio da junta (mm/s); Veq = velocidade equivalente de soldagem (mm/s); *Experimento da Tabela 4.15

Obs 2 (parâmetros invariáveis): A = amplitude transversal de movimento da tocha igual a 9 mm; curso do *Switch-back* igual a 7,5 mm; Valim+ = velocidade de alimentação na polaridade CC+ igual a 3,7 m/min; Valim- = velocidade de alimentação na polaridade CC- igual a 3,3 m/min; Valimap = velocidade de alimentação aparente ponderada igual a 3,6 m/min; Polaridade positiva (CC+): Ip = corrente de pulso igual a 270 A; tp = tempo de pulso igual a 9,6 ms; Ib = corrente de base igual a 40 A; tb = tempo de base igual a 14,9 ms; Im+ = corrente média na polaridade positiva igual a 130 A; Polaridade negativa (CC-): Im- = corrente média na polaridade negativa (CC-) igual a -72 A; DBCP = distância bico de contato peça igual a 22 mm; gás de proteção Ar+8%CO₂ (Ar+10%CO₂)

Como é possível notar, o cordão exibiu falta de material no meio da junta por causa do aumento da velocidade equivalente, especificamente pelo aumento considerável da velocidade da tocha no meio da junta (VtCC-). Isso mostra mais uma vez que o processo de soldagem é bastante sensível a pequenas mudanças de parâmetros de soldagem, o que pode ser benéfico do ponto de vista de um controle malha fechada no futuro (os defeitos pode ser evitados com pequenas mudanças ao longo da soldagem).

4.8 – Considerações Finais

Embora tenha-se realizado diferentes variações ao longo desta etapa nos parâmetros do processo de soldagem em desenvolvimento, falta de fusão foi o principal limitante para produzir cordões de boa qualidade. Apesar disso, mesmo que de forma não muito robusta, se demonstrou a existência de uma faixa de balanço de calor (tempo em CC+/tempo em CC-) capaz de produzir cordões sem defeitos, dependendo do nível de corrente e gás de proteção utilizado. A formação do cordão é influenciada por vários parâmetros, como por exemplo, velocidades do processo, Fator Energético ponderado e tempos de funcionamento em cada programa por curso de solda, que muitas das vezes são interdependentes, o que dificulta ainda mais a operação em níveis adequados.

CAPÍTULO V

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE SOLDAGEM MIG/MAG COM REVERSÃO SINCRONIZADA DO SENTIDO DA TOCHA E DA POLARIDADE (MIG/MAG RSSP) COM PULSADO EM CC+ NAS LATERAIS E CURTO-CIRCUITO CONTROLADO EM CC- NO CENTRO DA JUNTA

Em função dos problemas relacionados à variação de comprimento do arco durante a soldagem do passe central com CC- e variação do perfil do cordão formado nas laterais da junta, duas abordagens foram propostas: soldar com Curto-Circuito Controlado na polaridade negativa (CCC-); e utilizar uma trajetória com reversão sincronizada de sentido de movimento da tocha e polaridade (*Switch-back*) com sobreposição parcial de cursos.

5.1 – Parametrização da técnica Curto-Circuito Controlado em polaridade negativa

Ao longo do trabalho foi percebido que o arco no modo de corrente CC- varia. Isso acontece no momento da troca de polaridade, de CC+ para CC-; o arco continua longo (por pelo menos 0,5 segundo), vindo da polaridade CC+, e depois diminui seu tamanho levemente, podendo até mesmo entrar em curto-circuito. Em CC-, não seria adequado deixar o arco longo, devido à formação de gotas grandes (bem maiores do que o diâmetro eletrodo) típicas de transferência do tipo globular. Considerando aplicações em soldagens fora de posição e a estabilidade do processo para utilização no passe de raiz, buscou-se uma forma de manter o arco curto na polaridade CC-. Assim, nesta parte do trabalho, utilizou-se a técnica curto-circuito controlado (CCC) na fase da polaridade negativa. O uso da técnica CCC- no meio da junta pode garantir um arco curto com boa estabilidade e poucos respingos, permitindo controlar melhor a poça de fusão, consequentemente com maior probabilidade de operar adequadamente fora da posição plana. A Figura 5.1 mostra a forma de onda típica da técnica CCC- e seus respectivos parâmetros.

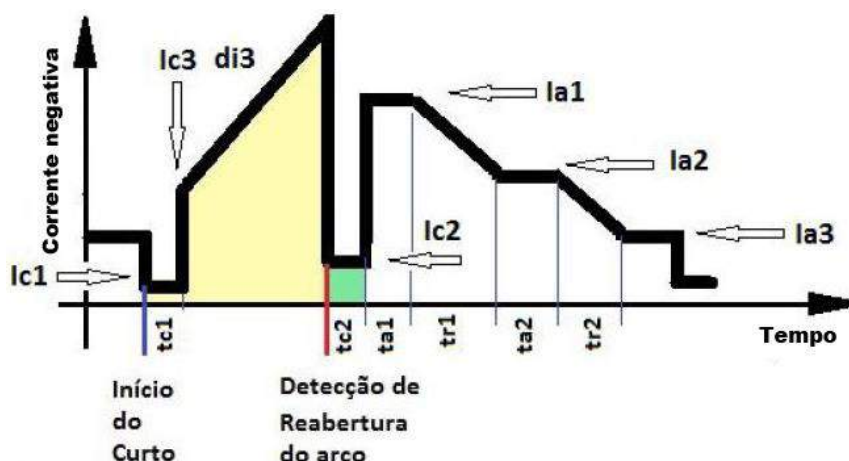


Figura 5.1 – Modelo da forma de onda da técnica CCC- e parâmetros invariáveis que foram utilizados neste trabalho: $ta1$ = tempo do arco 1 igual a 1,0 ms; $ta2$ = tempo do arco 2 igual a 7,0 ms; $Ic1$ = corrente do curto 1 igual a -20 A; $Ic2$ = corrente do curto 2 igual a -50 A; $tc1$ = tempo do curto 1 igual a 0,5 ms; $tc2$ = tempo do curto 2 igual a 0,7 ms; $di3$ = -100 A/ms; Ucc = tensão do curto circuito igual a -10 V; KR = 1,15; $tr1$ = 0,6 ms; $tr2$ = 0,6 ms; $Ia3$ = corrente do arco 3 igual a -40 A (IMC, 2012)

Para encontrar os parâmetros desejados para o processo CCC- que levam a um arco curto com boa estabilidade e um mínimo de respingos, foi mantida a mesma velocidade de alimentação de arame-eletrodo como no processo CC- convencional na soldagem MIG/MAG RSSP, igual a 3,5 m/min. No Experimento 5.1, além de manter a mesma velocidade de alimentação do arame-eletrodo, foi mantida a mesma corrente média da técnica CC-, igual a -72 A (calculada pela Equação 5.1). Mas, neste caso, como mostra a Figura 5.2, o acabamento do cordão foi ruim, pois este nível de corrente foi muito baixo para a velocidade de alimentação utilizada (o arame forçava-se sobre o material de base com pouca fusão). Por isso, como solução, foi encontrado um novo valor de corrente média (-127 A) para fundir o arame-eletrodo com velocidade de 3,5 m/min e ao mesmo tempo manter o arco curto, oscilograma de corrente e tensão mostra a Figura 5.3. Os parâmetros desta corrente média são apresentados na Tabela 5.1. A Figura 5.4 mostra o acabamento do cordão do Experimento 5.2 com estes parâmetros; cordão mais uniforme com alta convexidade, típico da polaridade direta (CC-).

$$I_m = \frac{\sum_{i=1}^n (I_n * t_n)}{\sum_{i=1}^n t_n} \quad (5.1)$$

Onde I_n – os valores das correntes (I) da forma de onda da técnica CCC (Figura 5.1), t_n – tempo de existência de cada valor de corrente I_n da forma de onda da técnica CCC-.

Tabela 5.1 – Parâmetros de soldagem para experimentos com CCC- realizados sobre chapa sem utilizar a técnica MIG/MAG RSSP

Nº exp.	Ia1 (A)	Ia2 (A)	Ic3 (A)	Im (A)	Val, (m/min)
5.1	-100	-50	-50	-72	3,5
5.2	-240	-120	-120	-127	3,5

Obs 1 (parâmetros variáveis, como mostra a Figura 5.1: Ia1 = corrente do arco 1, A; Ia2 = corrente do arco 2, A; Ic3 = corrente do curto 3, A; Im = corrente média, A; Valim = velocidade de alimentação do arame-eletrodo, m/min;

Obs 2 (parâmetros invariáveis): Veq = velocidade de soldagem equivalente igual a 4 mm/s; DBCP = distância bico de contato peça igual a 22 mm; gás de proteção Ar+8%CO₂ (Ar+10%CO₂); (os parâmetros invariáveis do modo Curto-Circuito Controlado (CCC) como mostra a Figura 5.1)



Figura 5.2 – Aspecto do cordão do Experimento 5.1 realizado sobre chapa com CCC- com corrente média igual a -72 A e velocidade de alimentação igual a 3,5 m/min (soldagem da esquerda para direita)

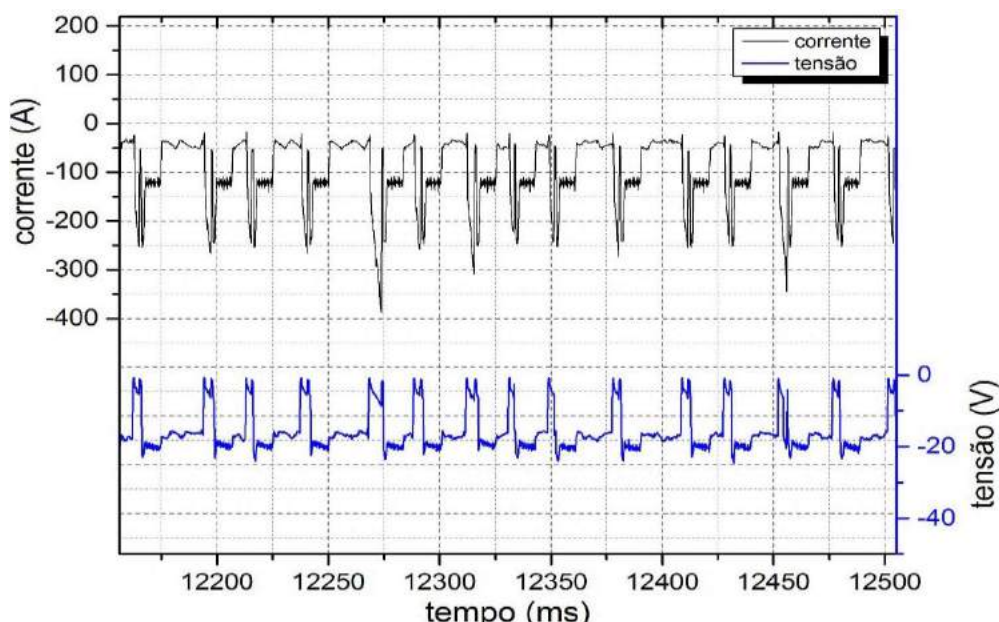


Figura 5.3 – Oscilograma da correntes e da tensão de soldagem do experimento realizado sobre chapa com CCC- com corrente média igual à -72 A e velocidade de alimentação igual à 3,5 m/min (similar ao Experimento 5.2 com a corrente média igual à -127 A e velocidade de alimentação de 3,5 m/min) (a tensão está com valor invertido)



Figura 5.4 – Aspecto do cordão do Experimento 5.2 realizado sobre chapa com CCC- com corrente média igual à -127 A e velocidade de alimentação igual à 3,5 m/min (soldagem da esquerda para direita)

Depois de definidos os parâmetros de soldagem para CCC-, foram feitos alguns testes com mudança de polaridade (entre Pulsado CC+ e CCC-) durante soldagem sobre chapa. A fonte de soldagem foi programada, como apresenta a Tabela 5.2, para operar 3,5 s em cada polaridade (programa de soldagem) com velocidade de soldagem da tocha igual a 4 mm/s. A Figura 5.5 mostra o aspecto típico do cordão obtido, resultando em menor largura durante a fase da polaridade negativa. Assim, ficou comprovado que a fonte é capaz de alternar entre os modos de soldagem agora propostos e que, neste caso, pode-se adicionar mais ou menos calor e material (penetração e metal depositado) conforme programado. A Figura 5.6 mostra o sinal de corrente com alternância das polaridades.

Tabela 5.2 – Parâmetros de soldagem para o Experimento 5.3 com Pulsado em CC+ e CCC- realizados sobre chapa sem utilizar a técnica MIG/MAG RSSP

Nº exp.	Tipo de Modo de solda	Tf (s)	Im (A)	Val (m/min)
5.3	CC+ Pulsado	3,5	130	3,9
	CCC-	3,5	-127	3,5

Obs 1: (parâmetros variáveis): Im = corrente média, A; Valim = velocidade de alimentação do arame-eletrodo, m/min;

Obs 2: (parâmetros invariáveis): Tf = tempo de funcionamento de programa, s; Veq = velocidade de soldagem equivalente igual a 4 mm/s; DBCP = distância bico de contato peça igual a 22 mm; gás de proteção Ar+8%CO₂ (Ar+10%CO₂); os parâmetros do modo Pulsado (CC+ Pulsado): Ip = corrente de pulso igual a 270 A; tp = tempo de pulso igual a 9,6 ms; Ib = corrente de base igual a 40 A; tb = tempo de base igual tempo de pulso igual a 14,9 ms; os parâmetros do modo curto circuito controlado (CCC-) como mostra a Figura 5.1: Ia1 = corrente do arco 1 igual a -240 A; Ia2 = corrente do arco 2 igual a -120 A; ta1 = tempo do arco 1 igual a 1,0 ms; ta2 = tempo do arco 2 igual a 7,0 ms; Ic1 = corrente do curto 1 igual a -20 A; Ic2 = corrente do curto 2 igual a -50 A; Ic3 = corrente do curto 3 igual a -120 A; tc1 = tempo do curto 1 igual a 0,5 ms; tc2 = tempo do curto 2 igual a 0,7 ms; di3 = -100 A/ms; Ucc = tensão do curto circuito igual a -10 V; KR = 1,15; tr1 = 0,6 ms; tr2 = 0,6 ms; Ia3 = corrente do arco 3 igual a -40 A

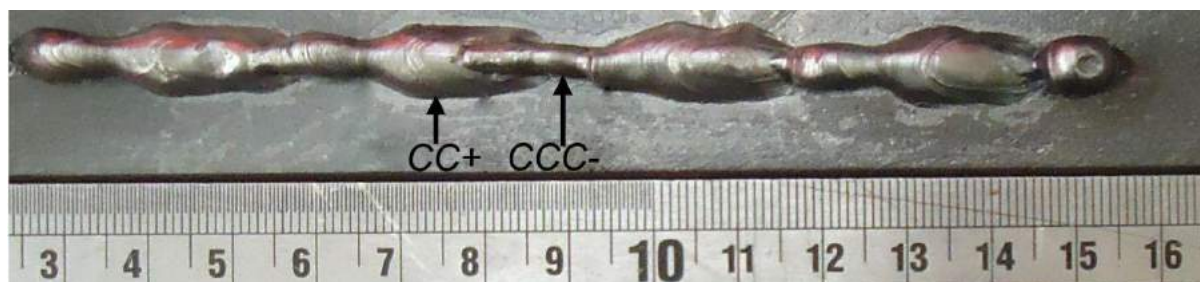


Figura 5.5 – Vista do cordão de solda com 3,5 s em cada polaridade (Pulsado em CC+ e CCC-) do Experimento 5.3 realizado sobre chapa (soldagem da esquerda para direita)

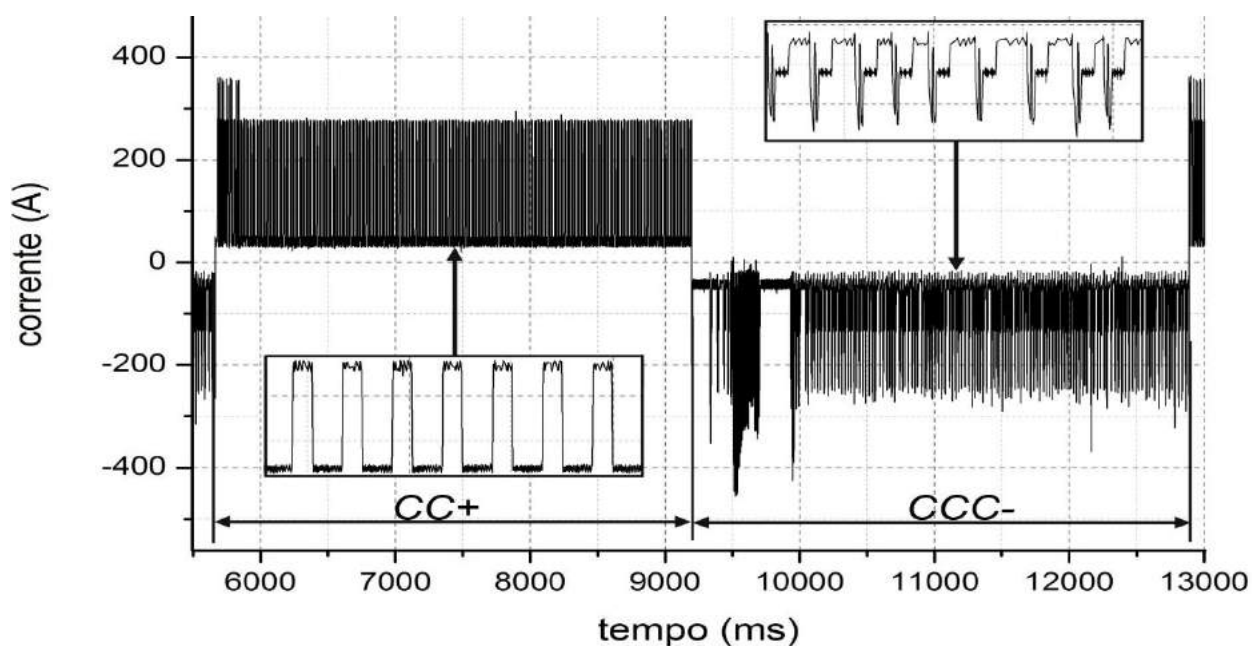


Figura 5.6 – Oscilograma da corrente de soldagem do Experimento 5.3 realizado com os dois modos operacionais (Pulsado em CC+ e CCC-)

5.2 – Sobreposição da trajetória do MIG/MAG RSSP

De início, de maneira exploratória, os parâmetros adequados do modo CCC- (Experimento 5.2 da Tabela 5.1) foram utilizados para soldar no meio (centro) da junta, enquanto que nas laterais foi utilizado o modo CC+ Pulsado, com os valores de amplitude de movimento transversal e de velocidade da tocha otimizados (Item 5.2) e demais parâmetros como os do Experimento 73 (Tabela 4.15 do Item 4.7). A Figura 5.7 mostra o aspecto do cordão resultante, evidenciando a ocorrência de perfurações.

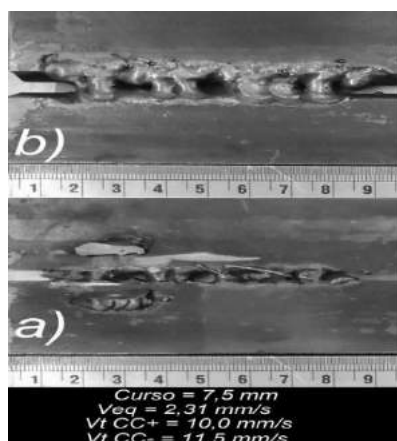


Figura 5.7 – Aspecto do cordão com curso da reversão sincronizada de polaridade de 7,5 mm sem sobreposição: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

Foi percebido que o arame-eletrodo na soldagem com modo CCC- parece precisar de apoio, no caso, de uma poça de fusão para absorver o metal de adição transferido. Na maioria dos casos foi percebido que a distância entre os cordões soldados nos laterais era grande no final de cada curso de soldagem por reversão de polaridade, como ilustra a Figura 5.8(a). Como solução para este problema, foi incluído um novo tipo de movimento na trajetória comum da reversão sincronizada de polaridade, o qual se denominou de sobreposição, como ilustra a Figura 5.8(b). O objetivo desta sobreposição foi tentar diminuir as variações de perfil dos cordões laterais, deixando um apoio mais constante ao longo da soldagem do passe central. A Figura 5.9 mostra a trajetória de movimento da tocha da técnica MIG/MAG RSSP utilizada neste caso com indicação do comprimento de sobreposição.

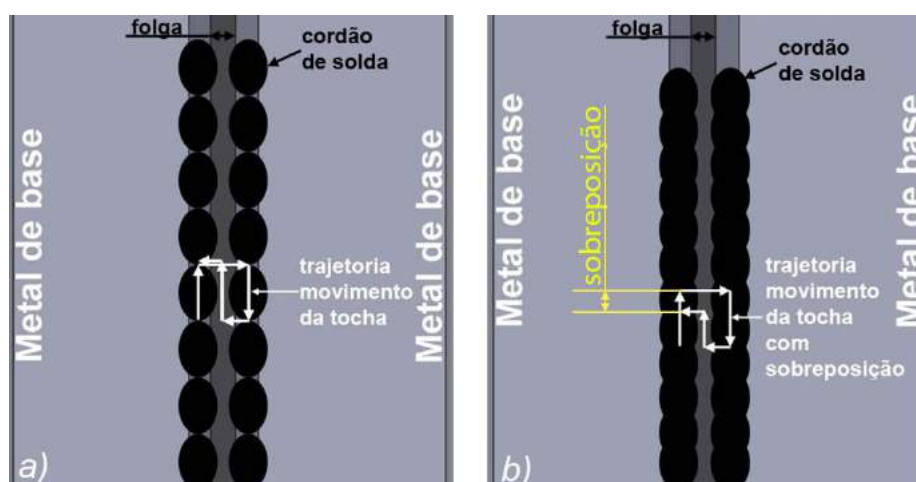


Figura 5.8 – Ilustração dos cordões nas laterais da junta no caso (a) sem e (b) com sobreposição na trajetória da reversão sincronizada de polaridade

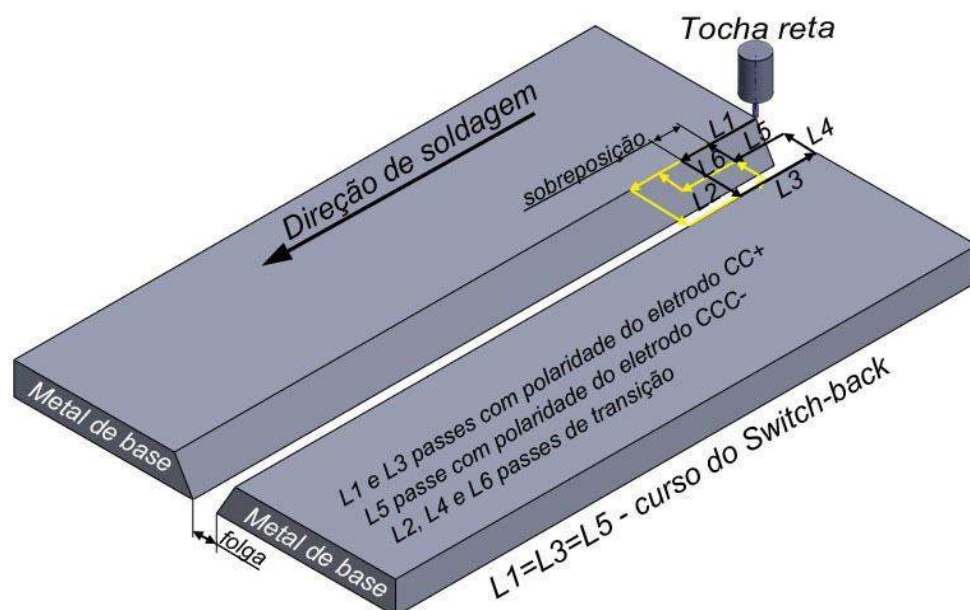


Figura 5.9 – Trajetória da técnica MIG/MAG RSSP com sobreposição

A Tabela 5.3 apresenta os parâmetros do Experimento 86 que foi feito com os mesmos parâmetros do Experimento 73 (Tabela 4.15, Item 4.7), mas com valor de sobreposição de 2 mm. O resultado deste experimento é apresentado na Figura 5.10. Como esperado, a sobreposição na trajetória de movimento da tocha mostrou-se capaz de diminuir e uniformizar a distância entre cordões nas laterais da junta e garantir o apoio para a soldagem no meio pelo processo CCC-.

Tabela 5.3 – Parâmetros de soldagem para teste com sobreposição na trajetória da técnica MIG/MAG RSSP

Nº exp.	VtCC+ (mm/s)	VtCC- (mm/s)	Tipo da trajetória da reversão sincronizada de polaridade	Veq (mm/s)	Vud (mm ³)
86	10,5	11,5	Sobreposição de 2 mm	2,05	34,7

Obs 1 (parâmetros variáveis): VtCC+ = velocidade da tocha nas laterais da junta, mm/s; VtCC- = velocidade da tocha no meio da junta mm/s; Veq= velocidade equivalente de soldagem, mm/s; Vud = volume unitário depositado, mm³;

Obs 2 (parâmetros invariáveis): A = amplitude transversal de movimento da tocha igual a 9 mm; curso da reversão sincronizada de polaridade igual a 7,5 mm; Valim+ = velocidade de alimentação na polaridade CC+ igual a 3,7 m/min; Valim- = velocidade de alimentação na polaridade CC- igual a 3,3 m/min; Valimap = velocidade de alimentação aparente igual a 3,6 m/min; Polaridade positiva (CC+): Ip = corrente de pulso igual a 270 A; tp= tempo de pulso igual a 9,6 ms; Ib = corrente de base igual a 40 A; tb = tempo de base igual a 14,9 ms; Im+ = corrente média na polaridade positiva igual a 130 A; Polaridade negativa (CC-): Im- = corrente média na polaridade negativa (CC-) igual a -72 A; DBCP = distância bico de contato peça igual a 22 mm; gás de proteção Ar+8%CO₂ (Ar+10%CO₂)

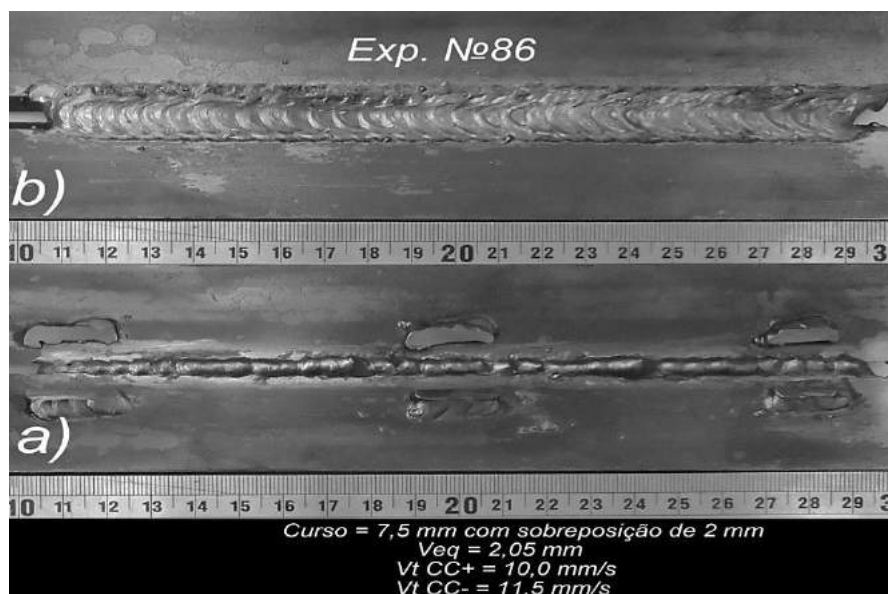


Figura 5.10 – Aspecto do cordão do Experimento 86 com curso da reversão sincronizada de polaridade de 7,5 mm e com sobreposição de 2 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

5.3 – Otimização da amplitude transversal do movimento e da velocidade da tocha nas laterais da junta (V_{tCC+}) com sobreposição de 2 mm na trajetória do modo RSSP

Primeiramente, para encontrar um valor de amplitude de movimento transversal da tocha otimizado, foram planejados e feitos alguns experimentos. A Tabela 5.4 apresenta os parâmetros de soldagem utilizados. Foram testadas três amplitudes (7, 8 e 9 mm), onde a soldagem foi feita apenas nas laterais dos chanfros no modo CC+ Pulsado (no meio da junta, o arco foi apagado, programando a corrente do CCC- com valor 0 A) sobre uma junta de topo com ângulo de chanfro igual à 60° e abertura de raiz (folga) de 4 mm. Os demais parâmetros de soldagem utilizados foram como os do Experimento 73 (Tabela 4.15, Item 4.7). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.5.


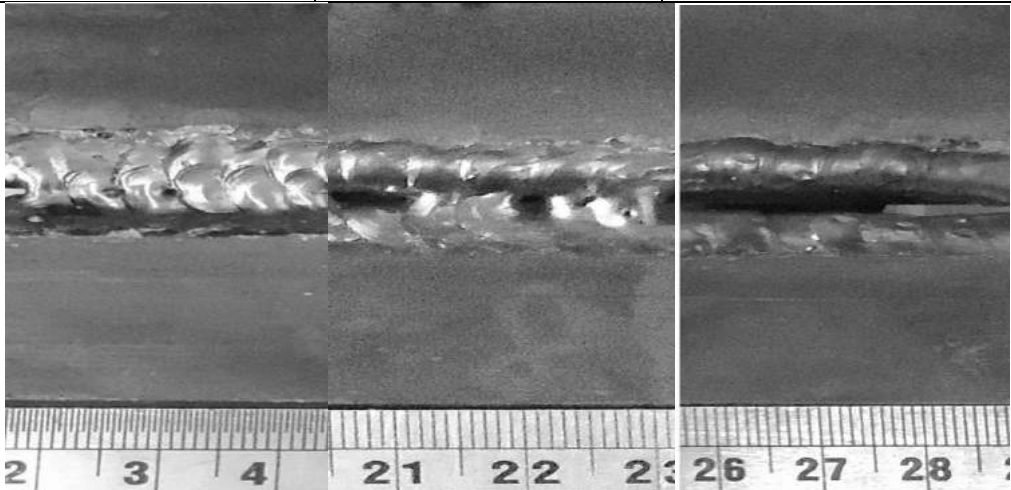
Tabela 5.4 – Parâmetros de soldagem para experimentos variando a amplitude transversal da tocha (velocidade equivalente de soldagem foi constante) para $I_{m+} = 130$ A, $I_{m-} = 0$ A e folga de 4 mm

Nº exp.	A (mm)	VtCC+ (mm/s)	VtCC- (mm/s)	Curso da reversão sincronizada de polaridade com sobreposição de 2,5 mm (mm)	Veq (mm/s)	Vud (mm ³)
5.4	7	10,5	12,0	7,5	2,28	22,4
5.5	8	10,5	12,0	7,5	2,17	23,6
5.6	9	10,5	12,0	7,5	2,06	24,8

Obs 1 (parâmetros variáveis): A = amplitude transversal de movimento da tocha, mm; Veq = velocidade equivalente de soldagem, mm/s;

Obs 2 (parâmetros invariáveis): Valim+ = velocidade de alimentação na polaridade CC+ igual a 3,9 m/min; Valim- = velocidade de alimentação na polaridade CC- igual a 0 m/min; Polaridade positiva (CC+): Ip = corrente de pulso igual a 270 A; tp = tempo de pulso igual a 9,6 ms; Ib = corrente de base igual a 40 A; tb = tempo de base igual a 14,9 ms; Polaridade negativa (CC-): Im- = corrente média na polaridade CC- igual a 0 A; Im+ = corrente média na polaridade CC+ igual a 130 A; DBCP = distância bico de contato peça igual a 22 mm; Gás de proteção Ar+8%CO₂ (Ar+10%CO₂); VtCC+ = velocidade da tocha nas laterais da junta, mm/s; VtCC- = velocidade da tocha no meio da junta, mm/s; Vud = volume unitário depositado, mm³

Tabela 5.5 – Resultados obtidos dos experimentos variando a amplitude transversal da tocha (a velocidade equivalente de soldagem foi constante = 10,5 mm/s) para $I_{m+} = 130$ A, $I_{m-} = 0$ A e folga de 4 mm

Nº exp.	5.4	5.5	5.6
Amplitude transversal	7 mm	8 mm	9 mm
Seção transversal			
Vista superior dos cordões soldados			

Analisando os resultados, pode-se perceber que com a amplitude de movimento transversal da tocha em 7 mm (Experimento 5.4) os cordões dos dois chanfros (lados) se

juntaram, mas ainda ocorreu falta de material no meio da junta. Já com a amplitude de 8 mm (Experimento 5.5), em alguns lugares os cordões não se juntaram, significando que um pequeno aumento de amplitude (1 mm) pode mudar o acabamento do cordão. Por fim, com amplitude de 9 mm (Experimento 5.6), dois cordões separados foram formados, confirmando a sensibilidade do processo a mudanças do valor de amplitude do movimento transversal da tocha com consequências sobre a penetração, acabamento da face de raiz, etc. Entretanto, esse valor de amplitude de 9 mm pode ser mais adequado para trabalhar com CCC- no meio da junta, por produzir depósitos laterais regulares e separados o suficiente para tolerar variações de alinhamento da junta.

Num segundo momento, para encontrar um valor de velocidade da tocha otimizado, foram feitos alguns experimentos também com a soldagem feita apenas nas laterais dos chanfros no modo CC+ Pulsado (no meio da junta o arco foi apagado programando a corrente do CCC- com valor 0 A) sobre uma junta de topo com ângulo de chanfro igual à 60° e abertura de raiz (folga) de 4 mm. A Tabela 5.6 apresenta os parâmetros de soldagem utilizados. Foram testados três velocidades da tocha nas laterais da junta (V_{tCC+}), 9,5; 10,5; e 11,5 mm/s. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.7. A Figura 5.11 mostra os sinais da corrente de soldagem e dos sensores de movimento típicos resultantes.





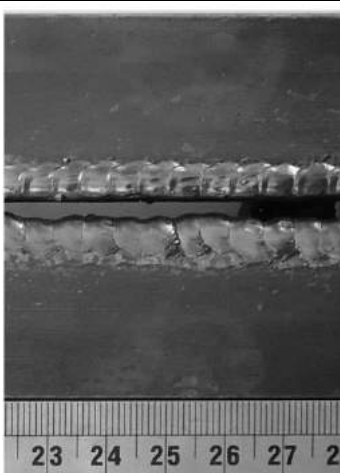
Tabela 5.6 – Parâmetros de soldagem para experimentos variando a velocidade da tocha (a amplitude transversal da tocha foi constante) para $I_{m+} = 130$ A, $I_{m-} = 0$ A e folga de 4 mm

Ne exp.	A (mm)	V_{tCC+} (mm/s)	V_{tCC-} (mm/s)	Curso da reversão sincronizada de polaridade com sobreposição de 2,5 mm (mm)	V_{eq} (mm/s)	V_{ud} (mm ³)
5.7	9	9,5	12,0	7,5	1,91	27,5
5.8	9	10,5	12,0	7,5	2,06	24,8
5.9	9	11,5	12,0	7,5	2,20	22,5

Obs 1 (parâmetros variáveis): V_{tCC+} = velocidade da tocha nas laterais da junta, mm/s; V_{eq} = velocidade equivalente de soldagem, mm/s; V_{ud} = volume unitário depositado, mm³;

Obs 2 (parâmetros invariáveis): A = amplitude transversal de movimento da tocha; V_{lim+} (velocidade de alimentação na polaridade CC+) = 3,9 m/min; V_{lim-} (velocidade de alimentação na polaridade CC-) = 0 m/min; Polaridade positiva (CC+): I_p = corrente de pulso igual a 270 A; t_p = tempo de pulso igual a 9,6 ms; I_b = corrente de base igual a 40 A; t_b = tempo de base igual a 14,9 ms; Polaridade negativa (CC-): I_{nCCC-} (corrente média no CCC-) = 0 A; I_{m+} (corrente média na polaridade CC+) = 130 A; DBCP (distância bico de contato peça) = 22 mm; Gás de proteção Ar+8%CO₂ (Ar+10%CO₂); V_{tCC-} = velocidade da tocha no meio da junta, mm/s

Tabela 5.7 – Resultados obtidos dos experimentos variando a velocidade da tocha (a amplitude de movimento da tocha é constante = 9 mm) para $I_{m+} = 130$ A, $I_{m-} = 0$ A e a folga de 4 mm

Nº exp.	5.7	5.8	5.9
Velocidade da tocha	9,5 mm/s	10,5 mm/s	11,5 mm/s
Seção transversal			
Vista superior dos cordões soldados			

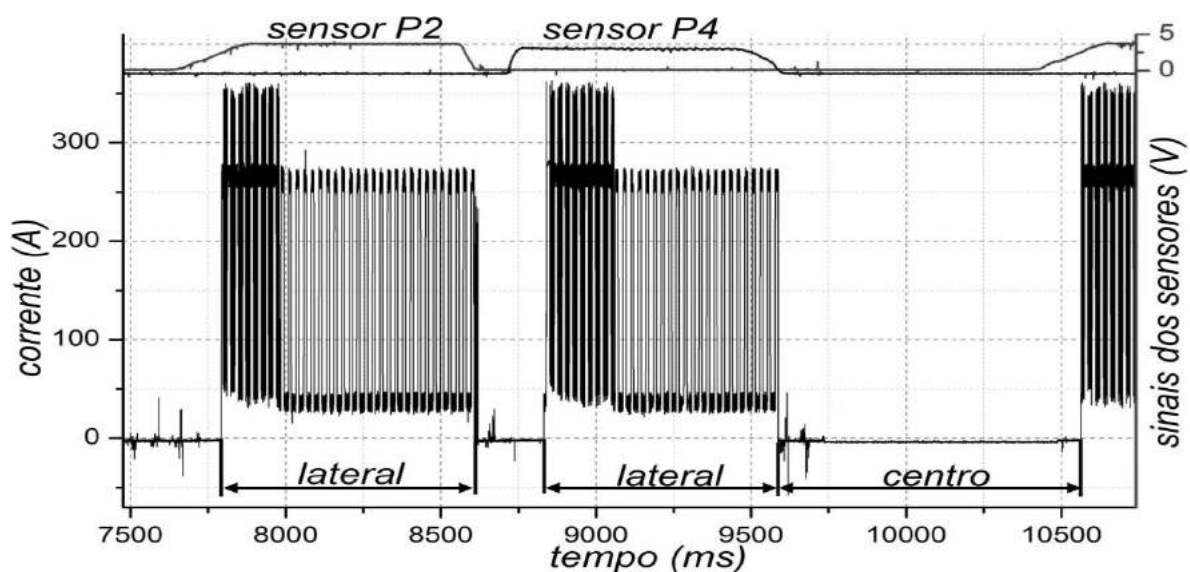


Figura 5.11 – Oscilogramas da corrente de soldagem e dos sensores de movimento da tocha do Experimento 5.7, típico dos experimentos realizados sem CCC- (o arco foi apagado no meio da junta)

Como esperado, menores velocidades de soldagem nas laterais da junta levaram à formação de cordões com maior área (volume), favorecendo o fechamento do chanfro. Apesar disso, os cordões realizados com velocidades maiores se mostram mais adequados

para permitir a deposição do passe central com CCC-. Neste caso, foi deixado um espaçamento regular entre as bordas, com maior vantagem para a velocidade de 10,5 mm/s (Experimento 5.8) por mostrar indícios de molhabilidade nas paredes do chanfro, o que pode ajudar a evitar falta de fusão nas paredes da junta ao se utilizar também o passe central.

5.4 – Otimização do valor da sobreposição na trajetória da técnica MIG/MAG RSSP

Nesta etapa, alguns experimentos foram realizados para encontrar um valor adequado/otimizado da sobreposição. A Tabela 5.8 mostra os parâmetros dos experimentos com sobreposições de 2; 2,5; 3,5 mm. As características visuais dos cordões dos experimentos realizados são mostradas nas Figuras 5.12 a 5.16.

Tabela 5.8 – Parâmetros de soldagem para experimentos com sobreposição de 2; 2,5 e 3,5 mm na trajetória da técnica MIG/MAG RSSP

Nº exp.	VtCC+ (mm/s)	VtCC- (mm/s)	Tipo da trajetória da reversão sincronizada de polaridade	Veq (mm/s)	Vud (mm ³)
88	10,0	11,5	Sobreposição de 2 mm	2,05	33,8
88r	10,0	11,5	Sobreposição de 2 mm	2,05	33,8
92	10,0	12,0	Sobreposição de 2,5 mm	2,06	33,7
96	11,0	13,0	Sobreposição de 3,5 mm	1,95	35,7
97	12,0	14,0	Sobreposição de 3,5 mm	2,10	33,1

Obs 1 (parâmetros variáveis): VtCC+ = velocidade da tocha nas laterais da junta, mm/s; VtCC- = velocidade da tocha no meio da junta, mm/s; Veq= velocidade equivalente de soldagem, mm/s; Vud = volume unitário depositado, mm³;

Obs 2 (parâmetros invariáveis): A = amplitude transversal de movimento da tocha igual a 9 mm; curso da reversão sincronizada de polaridade igual a 7,5 mm; Valim+ = velocidade de alimentação na polaridade CC+ igual a 3,9 m/min; Valim- = velocidade de alimentação na polaridade CC- igual a 3,3 m/min; Valimap = velocidade de alimentação aparente igual a 3,7 m/min; Polaridade positiva (CC+): Ip = corrente de pulso igual a 270 A; tp = tempo de pulso igual a 9,6 ms; Ib = corrente de base igual a 40 A; tb = tempo de base igual a 14,9 ms; Im+ = corrente média na polaridade positiva igual a 130 A; Polaridade negativa (CC-): Im- = corrente média na polaridade negativa (CC-) igual a -72 A; DBCP = distância bico de contato peça igual a 22 mm; gás de proteção Ar+8%CO₂ (Ar+10%CO₂)

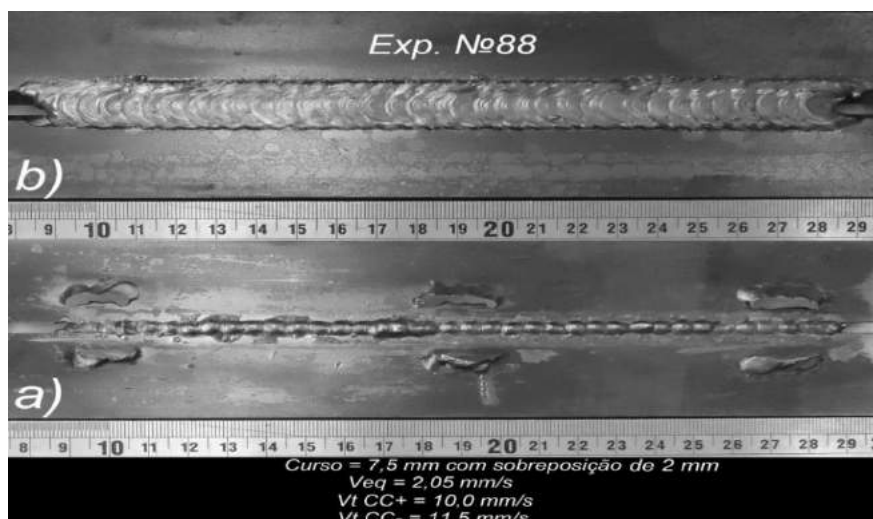


Figura 5.12 – Aspecto do cordão do Experimento 88 com curso de 7,5 mm, sobreposição de 2 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

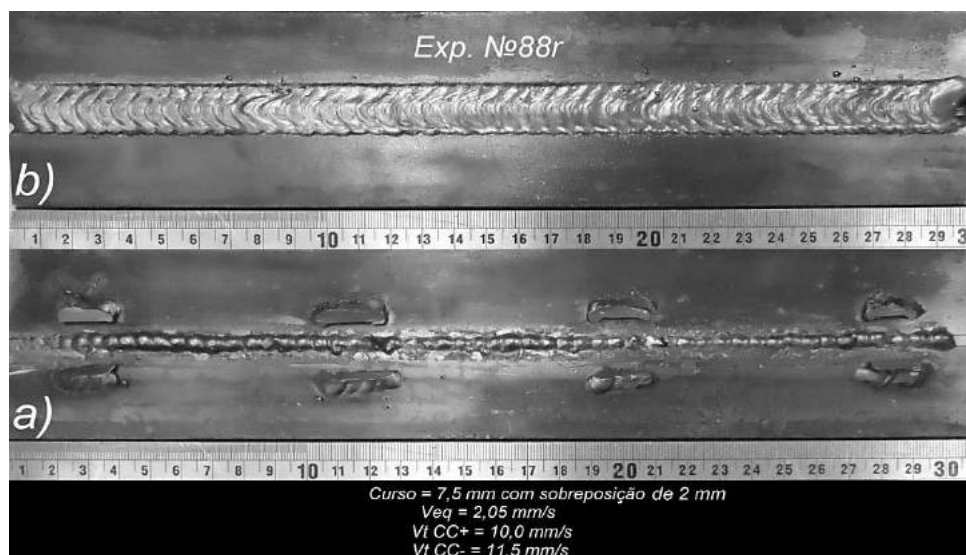


Figura 5.13 – Aspecto do cordão do Experimento 88 (réplica) com curso de 7,5 mm, sobreposição de 2 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

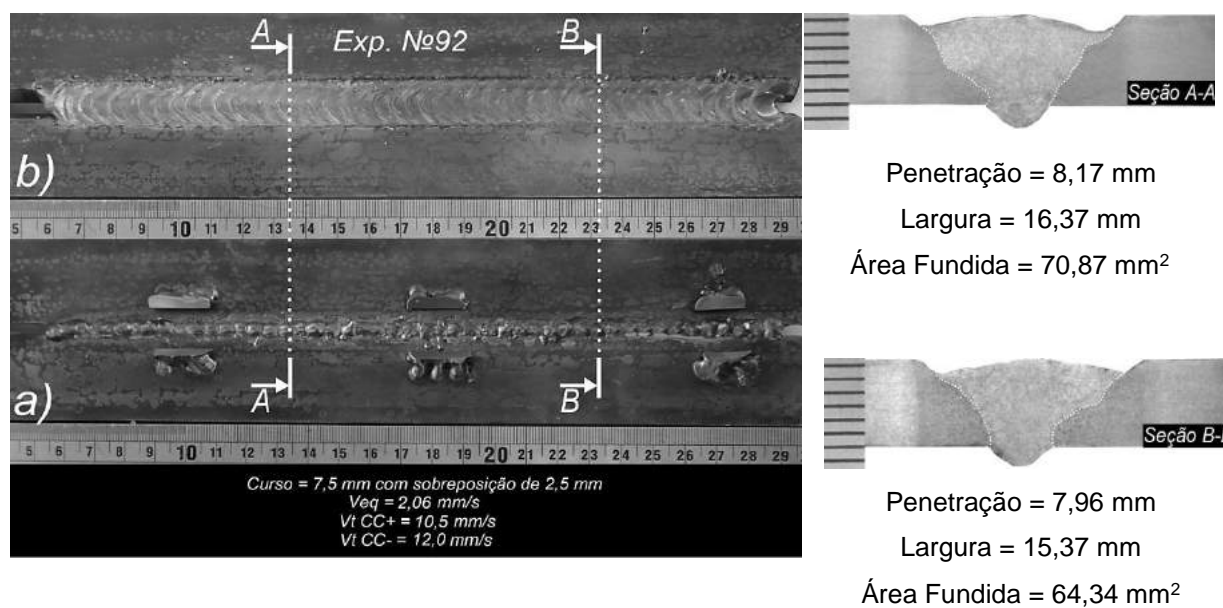


Figura 5.14 – Aspecto do cordão do Experimento 92 com curso de 7,5 mm, sobreposição de 2,5 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

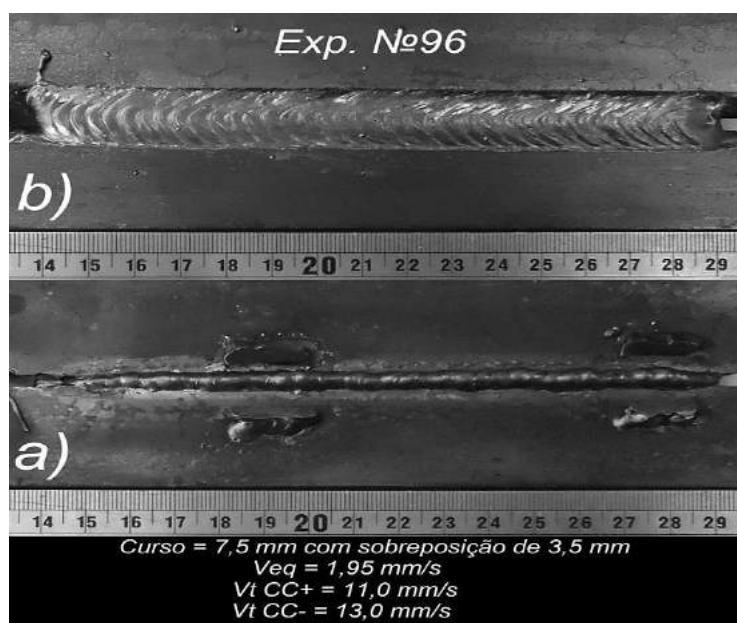


Figura 5.15 – Aspecto do cordão do Experimento 96 com curso de 7,5 mm, sobreposição de 3,5 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

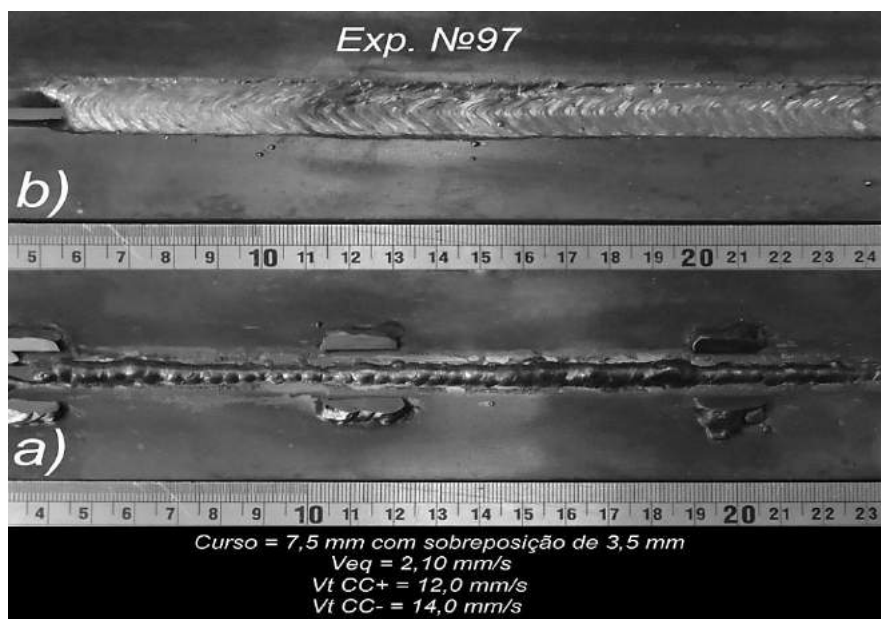


Figura 5.16 – Aspecto do cordão do Experimento 97 com curso de 7,5 mm, sobreposição de 3,5 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

Analisando os cordões obtidos com diferentes valores de sobreposição, pode-se dizer que esse valor tem grande influência sobre a formação do cordão de solda; os experimentos mostraram que quando maior o valor da sobreposição na trajetória da tocha, para uma mesma velocidade equivalente de soldagem (mantida aproximadamente igual neste estudo), o reforço na face de raiz tende a aumentar. Isso pode estar relacionado com a movimentação da fonte de calor, no caso o arco, que fica sempre perto dos cursos anteriores e deixa o metal de adição mais quente (menos viscoso), aumentando a penetração na raiz dos cordões de solda.

Os Experimentos 88 e 88r (Figuras 5.12 e 5.13) mostram os cordões resultantes com sobreposição de 2 mm. É possível notar que a face de raiz destes cordões apresentam “elos” mais distantes, que pode indicar tendência de falta de fusão nas laterais da junta soldada. Com o valor da sobreposição de 2,5 mm já houve melhora desta situação, com os “elos” na face de raiz mais juntos (Experimento 92 da Figura 5.14). Os Experimentos 96 e 97 (Figuras 5.15 e 5.16) mostram que estes “elos” ficaram tão próximos que formaram um reforço excessivo na face de raiz. Assim, o valor de sobreposição de 2,5 mm mostrou ser o mais adequado para os parâmetros de soldagem utilizados (Seções A-A e B-B da Figura 5.14), passando a ser adotado de agora em diante como padrão para testes subsequentes.

5.5 – Efeito do tecimento no passe central da técnica MIG/MAG RSSP

Neste item foram testadas duas diferentes formas de trajetória *para a reversão* sincronizada de polaridade, modificando o movimento no passe central da junta. A primeira delas foi denominada de “desvio lateral do movimento” (Figura 5.17) e outra de “movimento central com tecimento” (Figura 5.18). Teoricamente estas duas mudanças na trajetória poderiam melhorar o apoio para a transferência por CCC- no passe central.

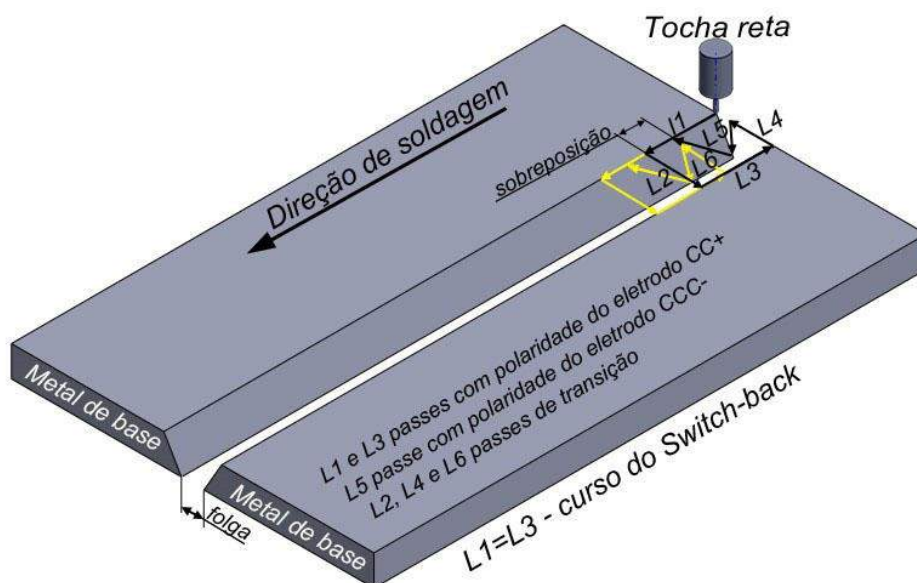


Figura 5.17 – Trajetória da técnica MIG/MAG RSSP com sobreposição e desvio lateral do movimento

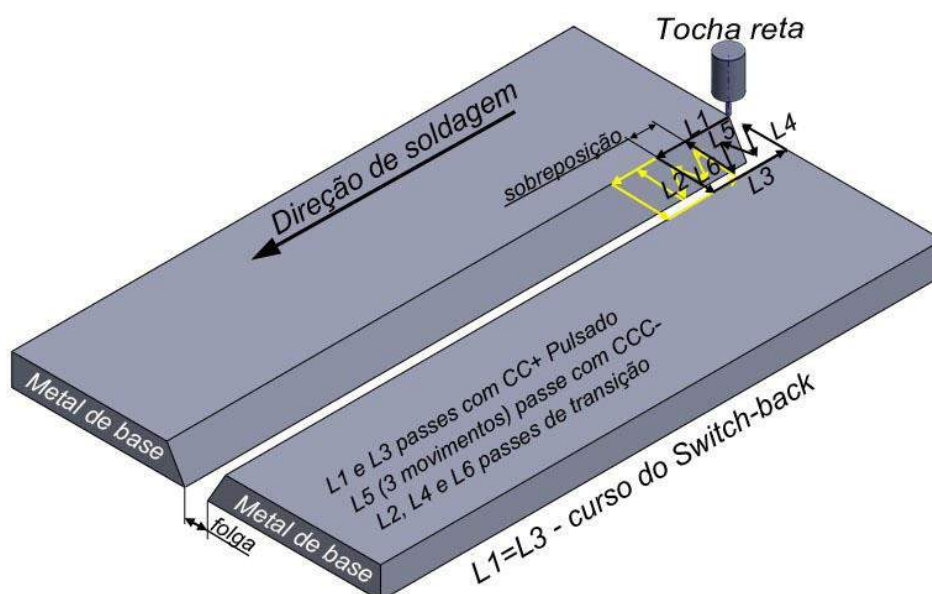


Figura 5.18 – Trajetória da técnica MIG/MAG RSSP com sobreposição e tecimento no centro da junta

Os parâmetros de soldagem utilizados com estas novas trajetórias são apresentados na Tabela 5.9 (parâmetros baseados no Experimento 92, como melhor resultado obtido com sobreposição (Tabela 5.8)). Os Experimentos 93 e 90 das Figuras 5.19 e 5.20 mostram os aspectos dos cordões resultantes. Com mudança de trajetória foi necessário calcular a velocidade equivalente no meio da junta (V_{eqCC-}) pela Equação 5.2.

$$V_{eqCC-} = V_{tCC-} * \frac{(Curso - S)}{\sum_{i=1}^n L_{n-}} \quad (5.2)$$

onde V_{tCC-} – velocidade da tocha (mm/s), Curso – curso da reversão sincronizada de polaridade (mm), S – sobreposição da trajetória de movimento da tocha (mm), L – passe de movimento no centro da junta (L_5 da Figura 5.16 e 5.17) (mm).

Tabela 5.9 – Parâmetros de soldagem para teste com desvio lateral do movimento e movimento central de tecimento na técnica MIG/MAG RSSP

Nº exp.	Tipo da trajetória da reversão sincronizada de polaridade	V_{tCC-} (mm/s)	V_{eq} (mm/s)	V_{ud} (mm ³)
93(92)	Sobreposição de 2,5 mm e desvio lateral do movimento	21,0	2,06	33,7
90(92)	Sobreposição de 2,5 mm e movimento central de tecimento	30,0	2,05	33,8

Obs 1 (parâmetros variáveis): V_{tCC-} = velocidade da tocha no meio da junta, mm/s; V_{eq} = velocidade equivalente de soldagem, mm/s; V_{ud} = volume unitário depositado, mm³;

Obs 2 (parâmetros invariáveis): V_{tCC+} = velocidade da tocha nas laterais da junta igual a 10,5 mm/s; V_{eqCC-} = velocidade equivalente no meio da junta igual a 12,0 mm/s; A = amplitude transversal de movimento da tocha igual a 9 mm; curso da reversão sincronizada de polaridade igual a 7,5 mm; $Valim+$ = velocidade de alimentação na polaridade CC+ igual a 3,9 m/min; $Valim-$ = velocidade de alimentação na polaridade CC- igual a 3,3 m/min; $Valimap$ = velocidade de alimentação aparente igual a 3,7 m/min; Polaridade positiva (CC+): I_p = corrente de pulso igual a 270 A; t_p = tempo de pulso igual a 9,6 ms; I_b = corrente de base igual a 40 A; t_b = tempo de base igual a 14,9 ms; I_{m+} = corrente média na polaridade positiva igual a 130 A; Polaridade negativa (CC-): I_{m-} = corrente média na polaridade negativa (CC-) igual a -72 A; DBCP = distância bico de contato peça igual a 22 mm; gás de proteção Ar+8%CO₂ (Ar+10%CO₂)

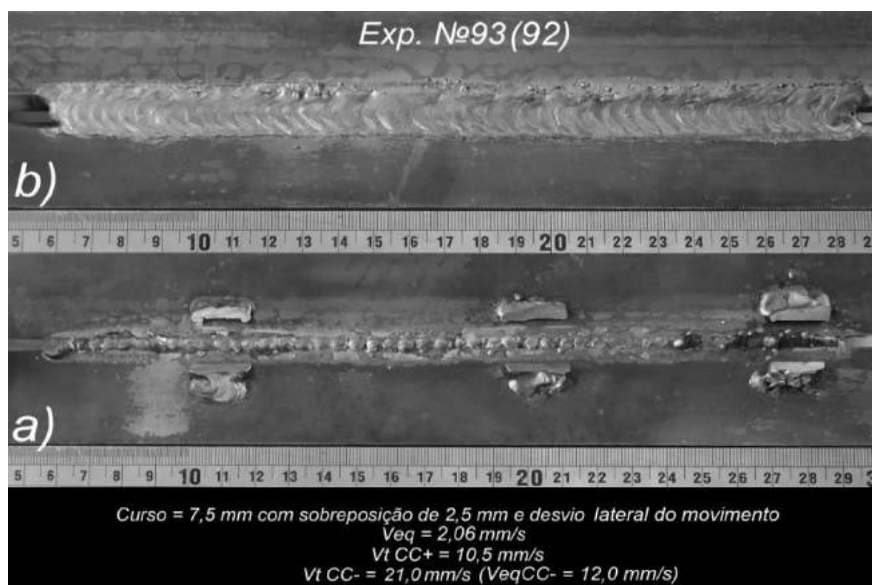


Figura 5.19 – Aspecto do cordão do Experimento 93 com desvio lateral do movimento com curso de 7,5 mm e com sobreposição de 2,5 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

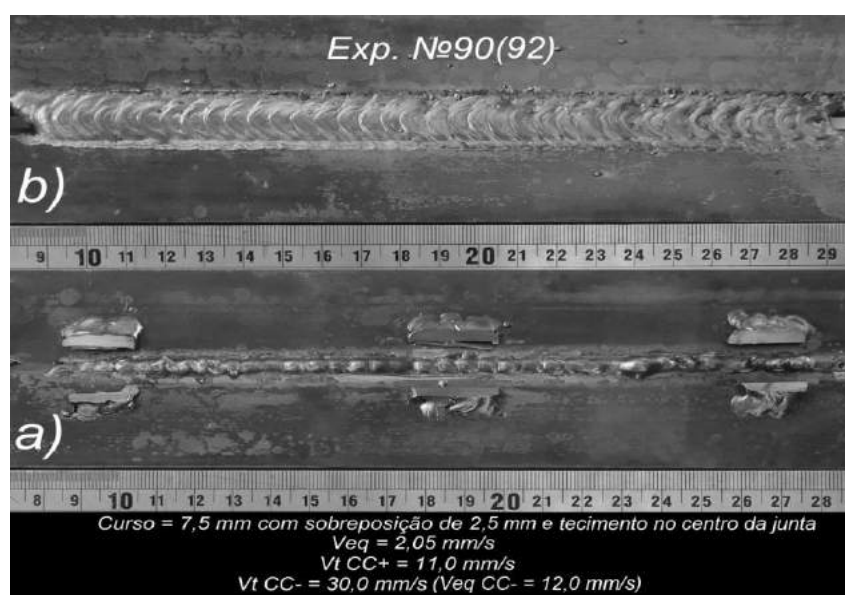


Figura 5.20 – Aspecto do cordão do Experimento 90 com movimento de tecimento central com curso de 7,5 mm e sobreposição de 2,5 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

Como pode-se observar, os resultados mostraram que qualquer tipo de movimento influencia a estabilidade do processo de soldagem, já que a transferência por curto-circuito, mesmo que controlada, fica sujeita a variações constantes de apoio (mudança de comprimento do arco, movimentação relativa excessiva da poça de fusão, etc.), instabilizando o processo CCC- no passe central.

5.6 – Considerações Finais

Ao se trocar o modo operacional CC- convencional para a soldagem no meio da junta pela técnica CCC-, resolveu-se o maior problema relacionado à estabilidade do processo no centro da junta (sem variações do arco ao longo da soldagem). Porém, mesmo assim a técnica CCC- não pode ser aplicada sem “apoio”, ou seja, sem sobreposição da trajetória de movimento da tocha com valor adequado (encontrado experimentalmente). A combinação dos dois modos de soldagem, Pulsado em CC+ e CCC-, mostra levar à boa estabilidade e repetibilidade do processo de soldagem. Além disto, os cordões soldados com CCC- no centro não apresentam falta de fusão nas laterais das juntas, provavelmente porque eles foram soldadas com maior Fator Energético ponderado (FEp), explicado no Capítulo 4 (maior a corrente média em CCC- do que nos testes com CC- convencional), fato compensado pelo menor comprimento de arco em CCC- (menor energia e menor pressão do arco, suportando mais facilmente a poça) comparado com o CC- convencional. No caso do CCC-, esse fator foi igual a 109 A/mm^2 , enquanto nos testes com CC- convencional este fator foi igual a 94 A/mm^2 - Experimento 73 da Tabela 4.15. Finalmente, o cordão de solda com melhor qualidade foi obtido sem nenhum movimento transversal no meio da junta.

CAPÍTULO VI

AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE SOLDAGEM MIG/MAG COM REVERSÃO SINCRONIZADA DO SENTIDO DA TOCHA E DA POLARIDADE (MIG/MAG RSSP) EM JUNTAS DESNIVELADAS E DESALINHADAS

Um dos maiores problemas da soldagem automatizada de dutos sem a utilização de cobrejunta é a variação involuntária da dimensão da folga (desalinhamento) e o desnivelamento (*high-low*) entre superfícies dos dutos. Isto pode ocorrer durante a fabricação de tubos (um tubo tem circularidade diferente do outro) ou devido a erros na montagem (posicionamento) dos mesmos antes de soldar (os tubos ficam “fora de centro” ou mal chanfrados), como pode ser ilustrado na Figura 6.1.

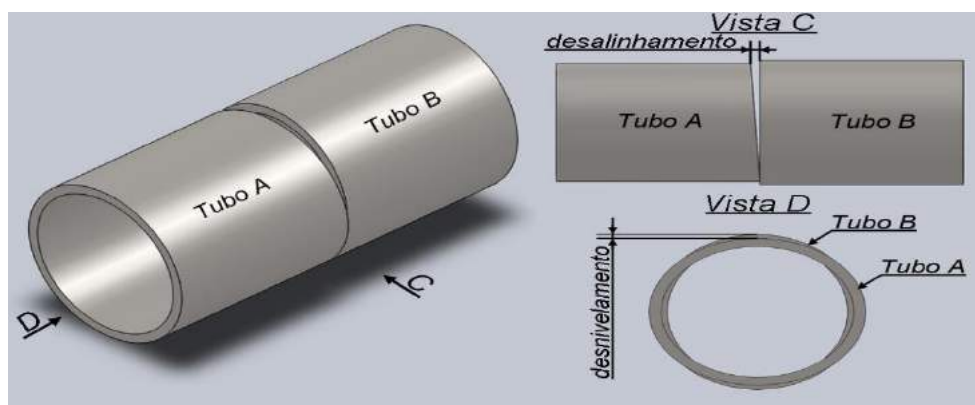


Figura 6.1 – Ilustração dos problemas de desalinhamento (folga variável) e desnivelamento (*high-low*)³ na soldagem de tubulações/dutos⁴

³ - Apesar da norma N-1738 do Petrobras, e provavelmente uma norma afim que está sendo discutida no âmbito da ABNT (PN 58:000.13-001/1 — Ensaaios não destrutivos — Terminologia — Parte 1: Descontinuidades em juntas soldadas), definir apenas desalinhamento e, de forma divergente da definição adotada neste trabalho, pois essa norma define desalinhamento com o que foi definido neste texto como desnivelamento, por achar mais correto a terminologia proposta, em que alinhamento está ligada à linha e nívelamento à nível, adotou-se neste trabalho uma terminologia própria.

⁴ - Apesar de um uso não padrão da terminologia, neste trabalho se faz referência a dutos como designação genérica de instalação constituída por tubos ligados entre si, incluindo os componentes e complementos, destinada ao transporte ou transferência de fluidos, entre as fronteiras de unidades operacionais geograficamente distintas e tubulações como conduto fechado que se diferencia de duto pelo fato de movimentar ou transferir fluido sob pressão dentro dos limites de uma planta industrial ou instalação de produção ou armazenamento de petróleo e seus derivados.

Para tentar superar este problema em chapa, foi testado o processo MIG/MAG com reversão sincronizada de sentido da tocha e polaridade de soldagem (MIG/MAG RSSP) em soldas na posição plana e comparado com outro processo de soldagem tipicamente utilizado para passe de raiz, no caso o RMD (*Regulated Metal Deposition*) da fabricante *Miller Electric* e patenteado em 2004 (MILLER, 2004). Os parâmetros de soldagem utilizados nesta etapa foram os mesmos do Experimento 92 (Tabela 5.8, Item 5.4), ou seja, para MIG/MAG Pulsado em CC+ nas laterais e MIG/MAG CCC- no centro da junta), que propiciou os melhores resultados.

6.1 – Aplicação da técnica MIG/MAG RSSP em juntas desniveladas (*high-low*)

Foram preparadas placas de teste de aço ao carbono (ABNT 1020) com espessura de 6,3 mm, em junta de topo, ângulo de bisel de 30 graus e abertura de raiz (folga) de $4,0 \pm 0,2$ mm para soldagem na posição plana. Em cada placa de teste, o valor de desnivelamento (*high-low*) foi progressivamente aumentado de 0 mm até um valor determinado no outro lado da placa ($1,0 \pm 0,2$; $2,0 \pm 0,2$; e $3,0 \pm 0,2$ mm), conforme ilustrado na Figura 6.2 e quantificado na Tabela 6.1. As chapas foram presas por pequenos “cachorros” soldados no verso das mesmas, usando-se um espaçador de 4 mm no meio delas. Em seguida, a abertura das placas de testes foi conferida entre os elementos de fixação por meio de um paquímetro.

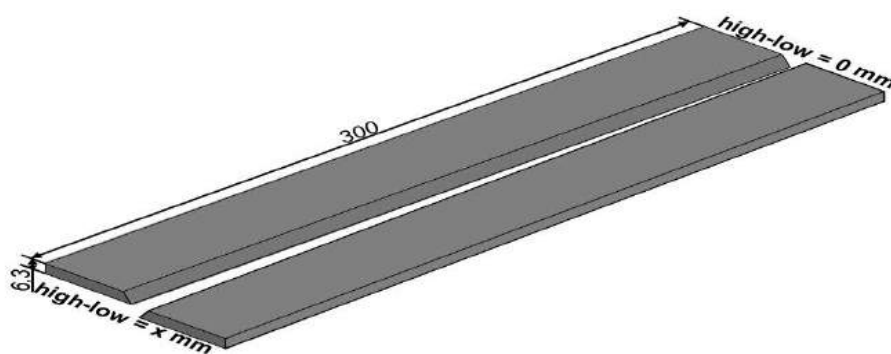


Figura 6.2 – Ilustração de preparação das placas de teste para experimentos com desnivelamento (*high-low*)

Tabela 6.1 – Valores de desnivelamento utilizados na avaliação de juntas desniveladas

Nº de exp.	Valor de desnivelamento (mm)
98	de 0 até 1,25
99	de 0 até 2,00
100	de 0 até 3,00

Os resultados das características visuais dos cordões dos experimentos realizados são mostrados nas Figuras de 6.3 até 6.5. A Tabela 6.2 mostra as seções transversais para

alguns valores de desnivelamento (*high-low*).

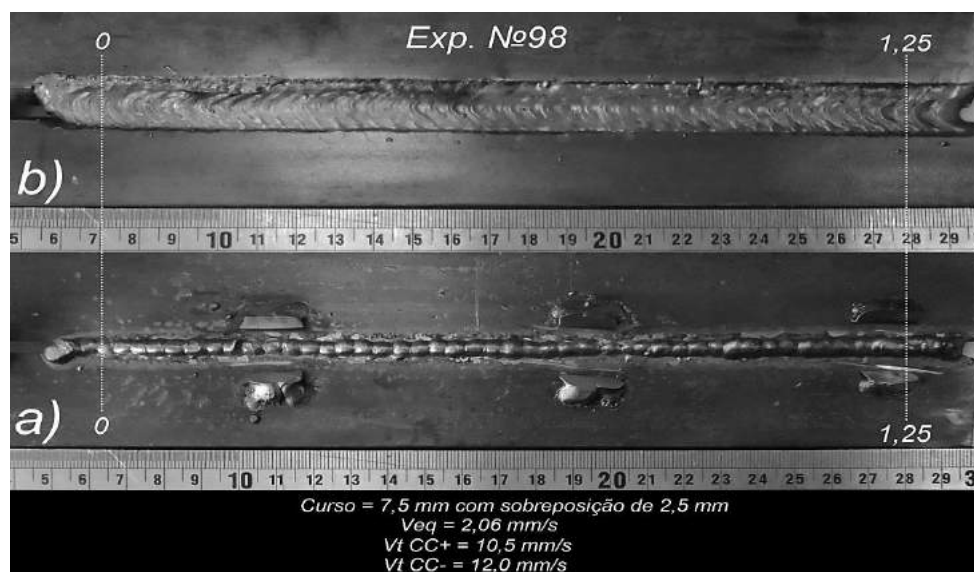


Figura 6.3 – Aspecto do cordão do Experimento 98 com desnivelamento (*high-low*) de 0 até 1,25 mm com curso da reversão (*Switch-back*) de 7,5 mm com sobreposição de 2,5 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

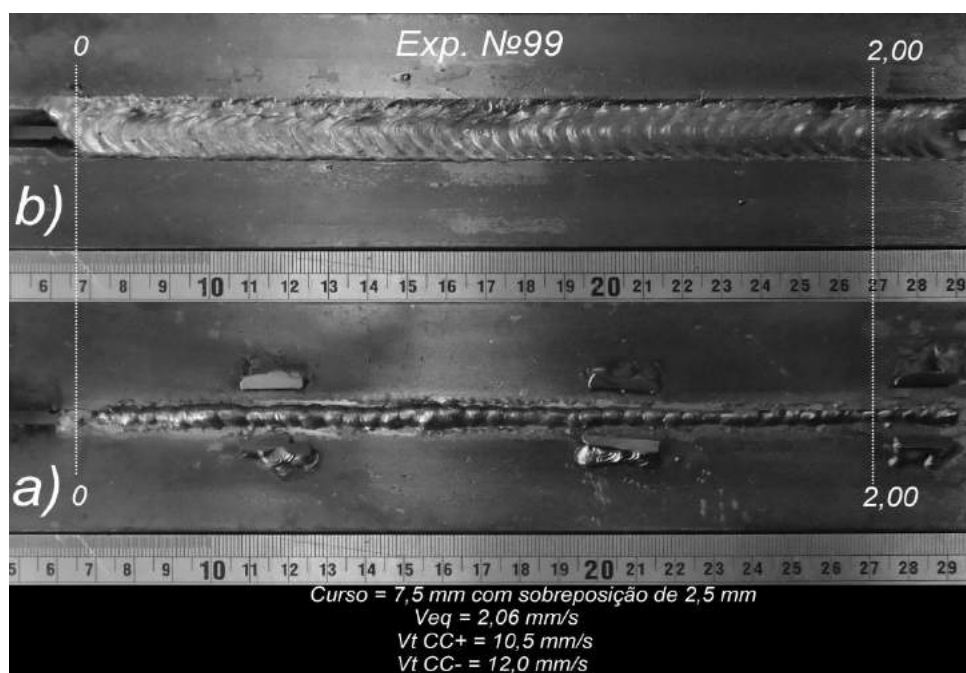


Figura 6.4 – Aspecto do cordão do Experimento 99 com desnivelamento (*high-low*) de 0 até 2,00 mm com curso da reversão (*Switch-back*) de 7,5 mm e sobreposição de 2,5 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

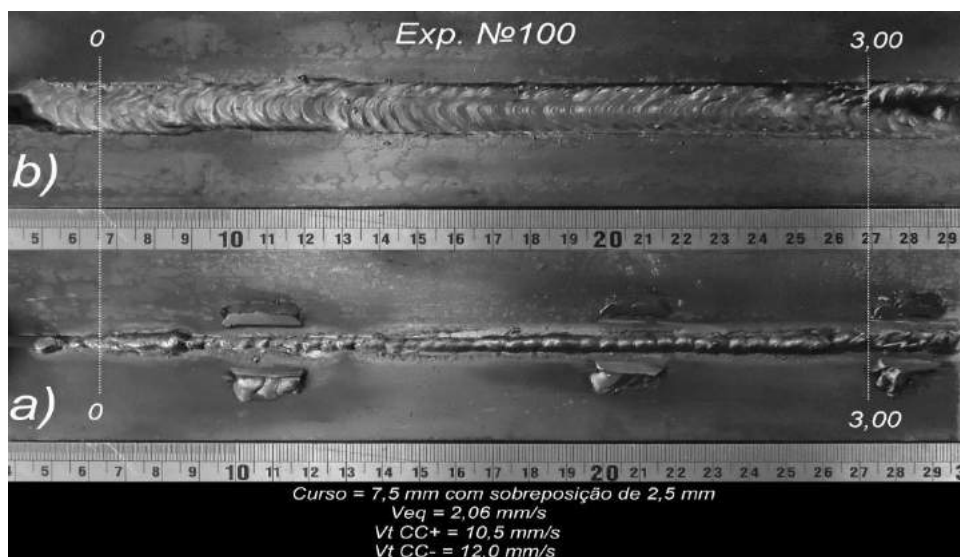
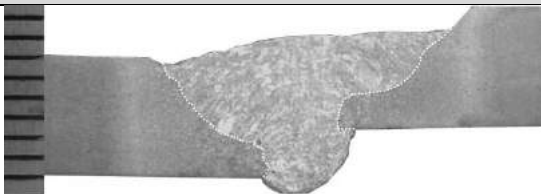
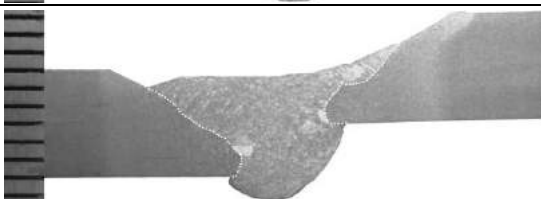


Figura 6.5 – Aspecto do cordão do Experimento 100 com desnivelamento (*high-low*) de 0 até 3,00 mm com curso da reversão (*Switch-back*) de 7,5 mm e sobreposição de 2,5 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

Tabela 6.2 – Seções transversais das soldas resultantes dos experimentos de desnivelamento (*high-low*) para $I_{m+} = 130 \text{ A}$ e $I_{m-} = -127 \text{ A}$ e folga de 4 mm

Desnivelamento (<i>high-low</i>) (mm)	Seção transversal	
0 (sem desnivelamento)		
1,0		
1,5		
2,0		

Desnivelamento (<i>high-low</i>) (mm)	Seção transversal
2,5	
3,0	

Como mostram as Figuras de 6.3 até 6.5 e Tabela 6.2, apesar do acabamento superficial dos cordões não ficarem planos (em função da própria geometria irregular do chanfro), a técnica MIG/MAG RSSP tem potencial para superar as variações de desnivelamento de até 3 mm na posição plana (com cordões sem defeitos).

6.2 – Aplicação da técnica MIG/MAG RSSP em juntas desalinhadas (folga variável)

Para testar a técnica MIG/MAG RSSP em juntas desalinhadas (folga variável) foram preparadas placas de teste de aço ao carbono (ABNT 1020) com espessura de 1/4" (6,3 mm), junta de topo, ângulo de bisel de 30 graus (Figura 6.6), as quais foram soldadas na posição plana. A folga foi variada de 3,0 até 5,2 de um lado a outro da chapa. As chapas foram presas por pequenos “cachorros” soldados no verso das mesmas, usando espaçadores com diferentes espessuras no meio delas para atingir o valor desejado da folga. Em seguida, a abertura das placas de testes foi conferida entre os elementos de fixação por meio de um paquímetro.

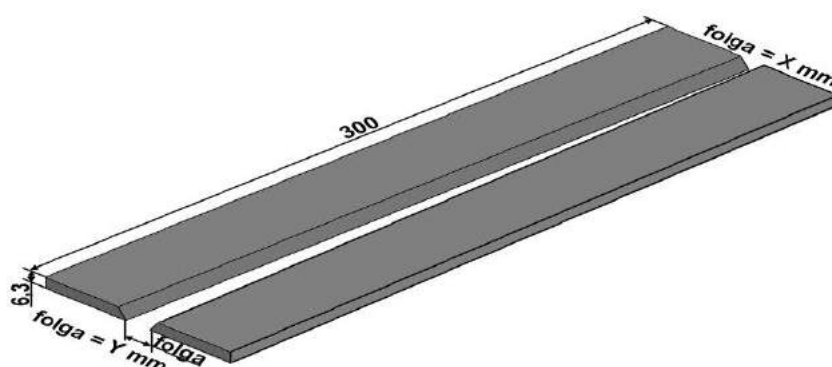


Figura 6.6 – Ilustração de preparação das placas de teste para experimentos com desalinhamento (folga variável)

Os resultados das características visuais dos cordões dos experimentos realizados são mostrados nas Figuras de 6.7 até 6.9. A Tabela 6.3 mostra as seções transversais para alguns valores de desalinhamento.

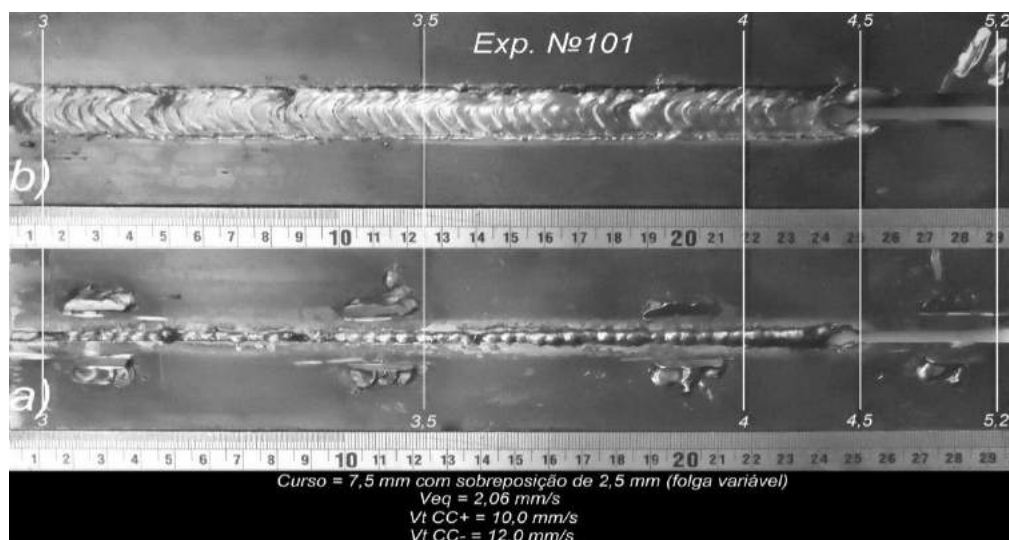


Figura 6.7 – Aspecto do cordão do Experimento 101 com folga variável de 3,0 até 5,2 mm com curso da reversão (*Switch-back*) de 7,5 mm e sobreposição de 2,5 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

Tabela 6.3 – Seções transversais dos resultados obtidos do Experimento 101 de desalinhamento (folga variável) para $I_{m+} = 130$ A e $I_{m-} = -127$ A

Desalinhamento (folga variável) (mm)	Seção transversal
3,5	
4,0	

A técnica MIG/MAG RSSP conseguiu superar as folgas variáveis, mostrando-se sensível a estas variações. Mas como visto, no Experimento 101 os parâmetros de soldagem utilizados foram adequados somente para faixa da folga de 3,5 até 4,0 mm. Para mostrar que o funcionamento adequado do processo com folgas maiores ou menores do que esta faixa é somente uma questão de seleção adequada de parâmetros, foram feitos mais 2 experimentos. Neste caso o parâmetro de atuação foi a amplitude de movimento transversal da tocha. Assim, o Experimento 103 foi feito com abertura de raiz de 3,0 mm e

amplitude de movimento da tocha de 8 mm e outro o Experimento 104 com folga de 4,5 mm e a amplitude de 10 mm. Os resultados destes testes são mostrados nas Figuras 6.8 e 6.9.

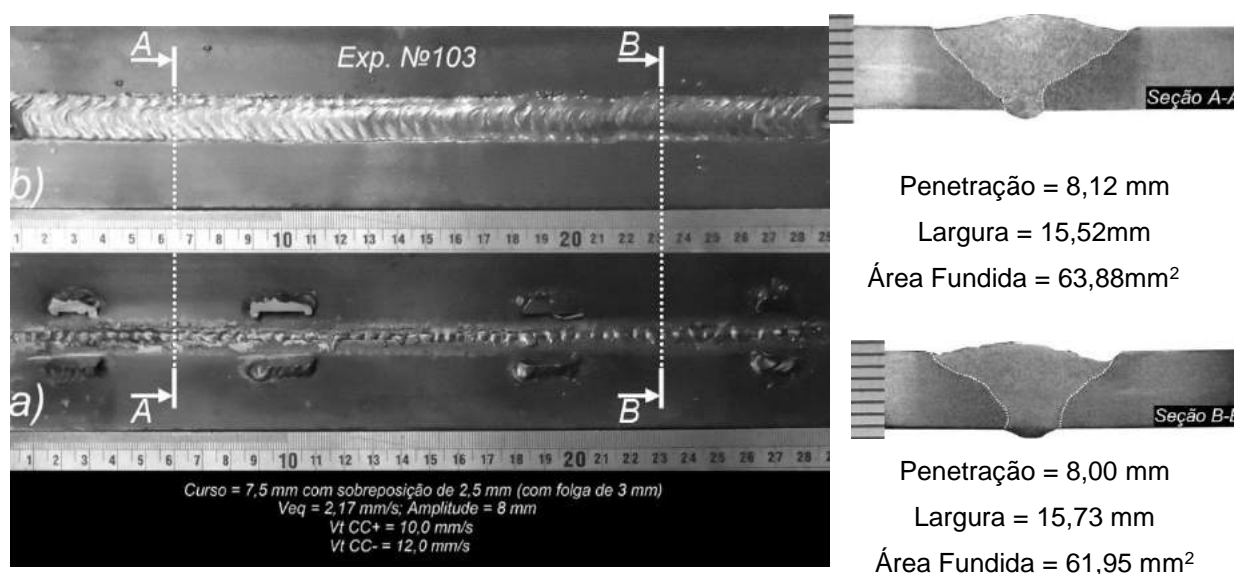


Figura 6.8 – Aspecto do cordão do Experimento 103 com folga constante de 3,0 mm com curso de reversão (*Switch-back*) de 7,5 mm e sobreposição de 2,5 mm e amplitude de 8 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

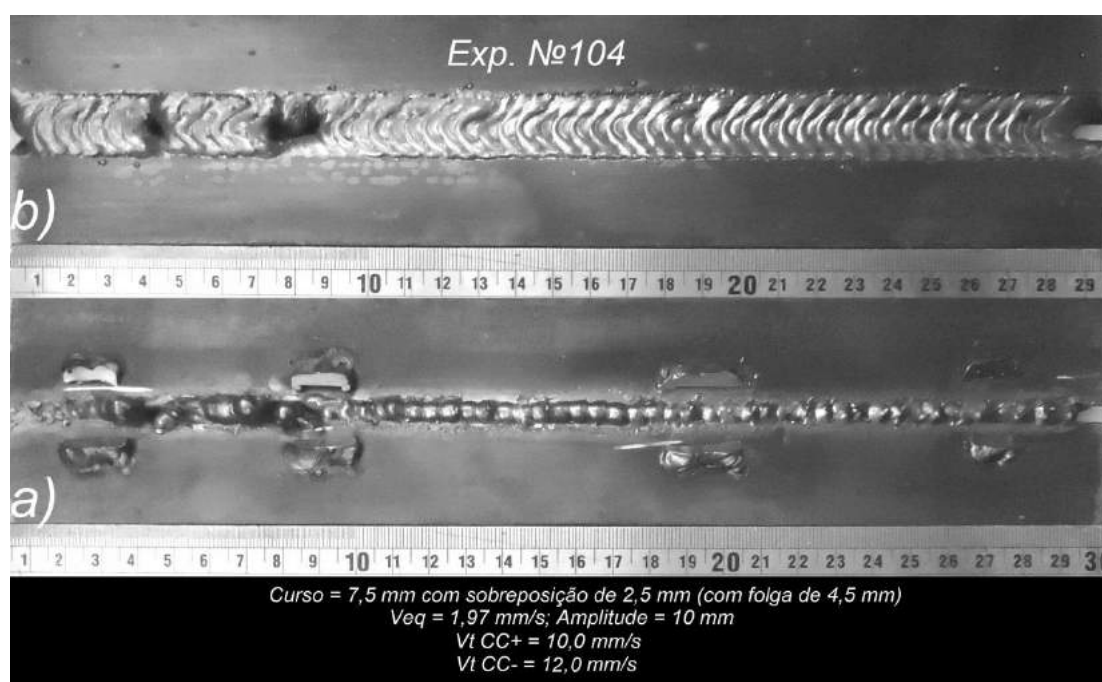


Figura 6.9 – Aspecto do cordão do Experimento 104 com folga constante de 4,5 mm com curso de reversão (*Switch-back*) de 7,5 mm e sobreposição de 2,5 mm e amplitude de 10 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

Como mostra a Figura 6.8 (Experimento 103), com folga de 3 mm e amplitude de 8 mm, o resultado foi melhorado, produzindo um cordão com bom acabamento da face de raiz (sem faltas de fusão, seções A-A e B-B da Figura 6.8). A Figura 6.9, por sua vez, mostra que com folga de 4,5 mm e amplitude de 10 mm, o resultado também foi melhorado, propiciando um cordão com bom acabamento na face de raiz (apesar de instabilidades iniciais).

Assim, para uma aplicação automatizada, a tolerância do processo quanto a desalinhamentos da junta pode ser melhorada com um sistema de sensores para monitorar o valor da folga e modificar em tempo real os parâmetros de soldagem, por exemplo, a amplitude de movimento transversal da tocha.

6.3 – Comparação da técnica de soldagem MIG/MAG com reversão sincronizada de sentido da tocha e polaridade de soldagem (MIG/MAG RSSP) com outro processo de soldagem para passe de raiz

Para comparar o desempenho da técnica de soldagem MIG/MAG em desenvolvimento neste trabalho com uma técnica já existente e indicada para passe de raiz, foram feitos alguns experimentos com o processo MIG/MAG com a técnica RMD (*Regulated Metal Deposition*), desenvolvida e comercializada pela *Miller Electric*. Este processo foi escolhido por ser uma alternativa utilizada industrialmente nas soldagens de passe de raiz, no caso com transferência metálica do tipo Curto-Circuito Controlado. Como ilustra a Figura 6.10, a técnica RMD é muito parecida com a técnica CCC (Curto-Circuito Controlado) utilizado no centro da junta quando da aplicação da técnica de soldagem MIG/MAG RSSP. Mais detalhes da técnica RMD e do seu desempenho podem ser encontrados em diversos trabalhos, por exemplo, em Costa (2011).

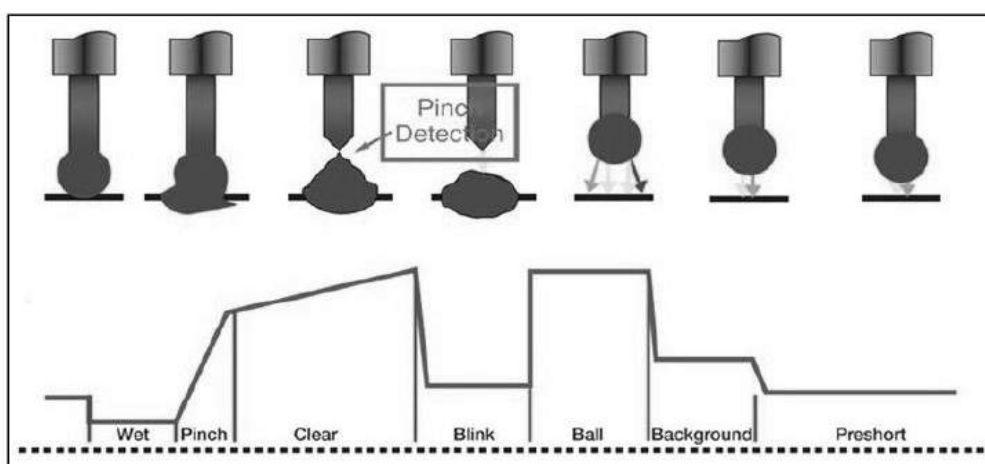


Figura 6.10 – Ilustração do formato de onda da corrente de soldagem para a técnica RMD (*Regulated Metal Deposition*) (MILLER, 2004)

De acordo com Costa (2011), no RMD existem dois parâmetros de regulação, *Trim* e *Arc Control*, que influenciam nas características geométricas do cordão de solda. O *Trim* tem a função muito parecida com a tensão de soldagem nas fontes convencionais, o seja, modifica o comprimento do arco, que influencia a estabilidade da transferência metálica e a geometria do cordão de solda. Já o ajuste do *Arc Control* é responsável pelo aquecimento do metal de base; o aumento do *Arc Control* aumenta a molhabilidade da interface entre o metal depositado e metal de base (aumenta a quantidade de calor transferida), que pode produzir cordões mais largos.

Para poder comparar de maneira justa as técnicas MIG/MAG RSSP e RMD, em primeiro lugar a velocidade de alimentação de arame-eletrodo e velocidade equivalente de soldagem foram ajustadas para se obter o mesmo volume dos cordões em ambas as técnica. E, em segundo lugar, a corrente média utilizada na técnica RMD foi mantida igual àquela da técnica Pulsada em CC+ ($I_{m+} = 130$ A) do MIG/MAG RSSP. A Tabela 6.4 mostra os parâmetros encontrados para a técnica RMD levando em conta essas exigências. A Figura 6.11 mostra o oscilograma de corrente e tensão de soldagem com a técnica RMD, tipicamente obtido em todos os experimentos realizados.

Tabela 6.4 – Parâmetros de soldagem da técnica RMD (*Regulated Metal Deposition*)

Arc Control	Trim	Valim (m/min)	Vs (mm/s)	Im (A)
25	50	3,2	2,06	129

Onde, *Valim* – velocidade de alimentação (m/min); *Vs* – velocidade de soldagem (mm/s); *Im* – corrente média (A), DBCP igual a 22 mm, arame AWS ER70S-6 com 1,2 mm de diâmetro

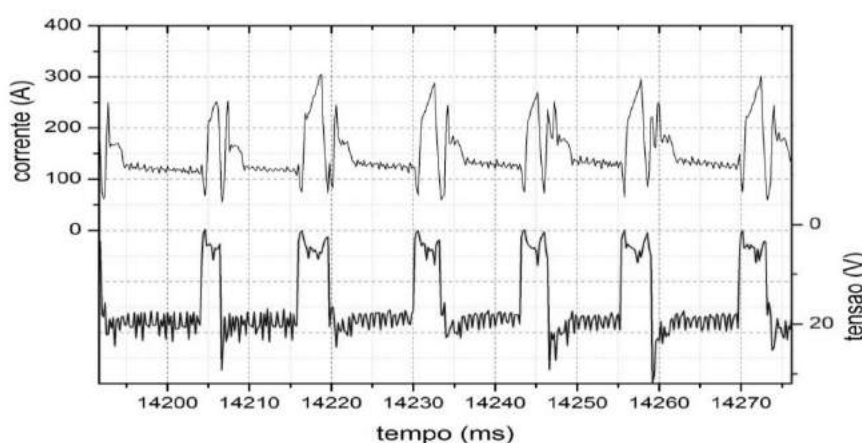


Figura 6.11 – Oscilograma de corrente e tensão de soldagem do Experimento 105 (típico de todos os experimentos realizados com a técnica RMD)

Inicialmente, o Experimento 105 foi realizado em placa de teste com folga de 4 mm, ou seja, sem variação de desnivelamento e desalinhamento ao longo da junta, para fins de comparação. Os parâmetros de soldagem são semelhantes aos utilizados no Experimento

92 (Tabela 5.8 do Item 5.4) e o resultado é mostrado na Figura 6.12. Como pode ser observado, apesar da perfuração no início o cordão, a técnica RMD foi capaz de produzir um cordão com excelente acabamento na superfície e na face de raiz. O cordão resultante foi muito parecido com cordão do Experimento 92 (Figura 5.15, Item 5.4).

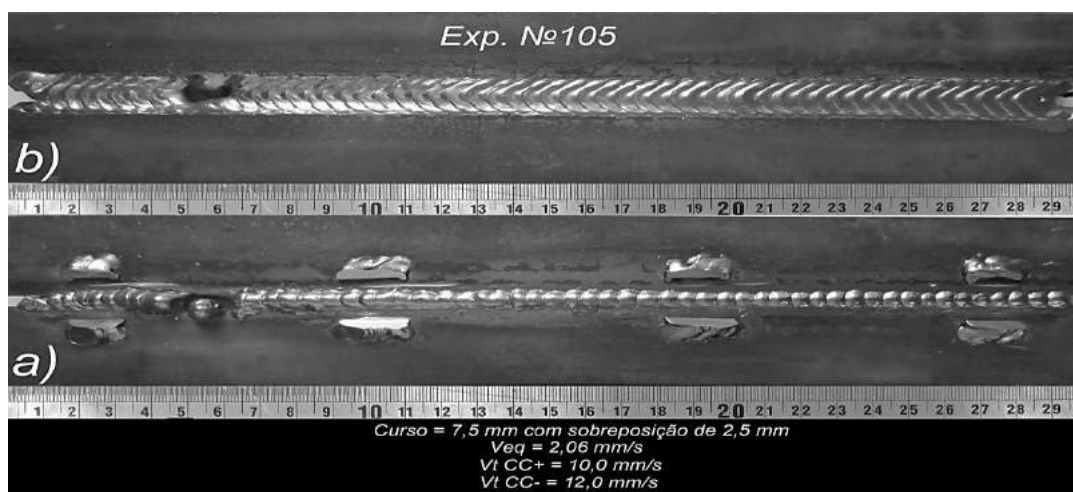


Figura 6.12 – Aspecto do cordão do Experimento 105 com folga constante de 4,0 mm com curso de reversão (*Switch-back*) de 7,5 mm e sobreposição de 2,5 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

Em seguida, foram preparadas placas de teste com progressivo aumento de desnivelamento e desalinhamento (itens 6.1 e 6.2.). Os resultados dos testes com a técnica RMD em termos de capacidade de superar desnivelamentos e desalinhamentos são mostrados nas Figuras 6.13 e 6.14. A Tabela 6.5 mostra as seções transversais do Experimento 107 com desalinhamento (folga variável) para $I_{m+} = 129$ A e a folga de 4 mm.

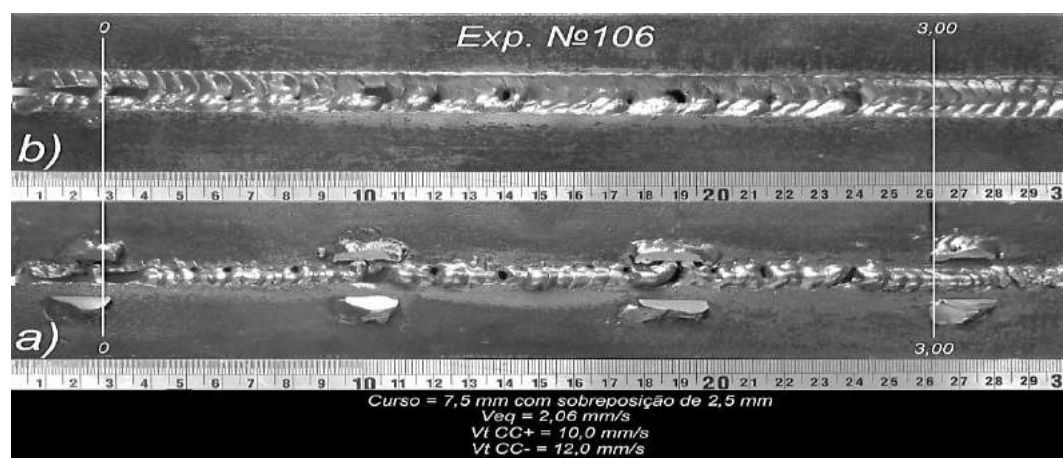


Figura 6.13 – Aspecto do cordão do Experimento 106 com desnivelamento (*high-low*) de 0 até 3,00 mm com curso de reversão (*Switch-back*) de 7,5 mm e sobreposição de 2,5 mm e

amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

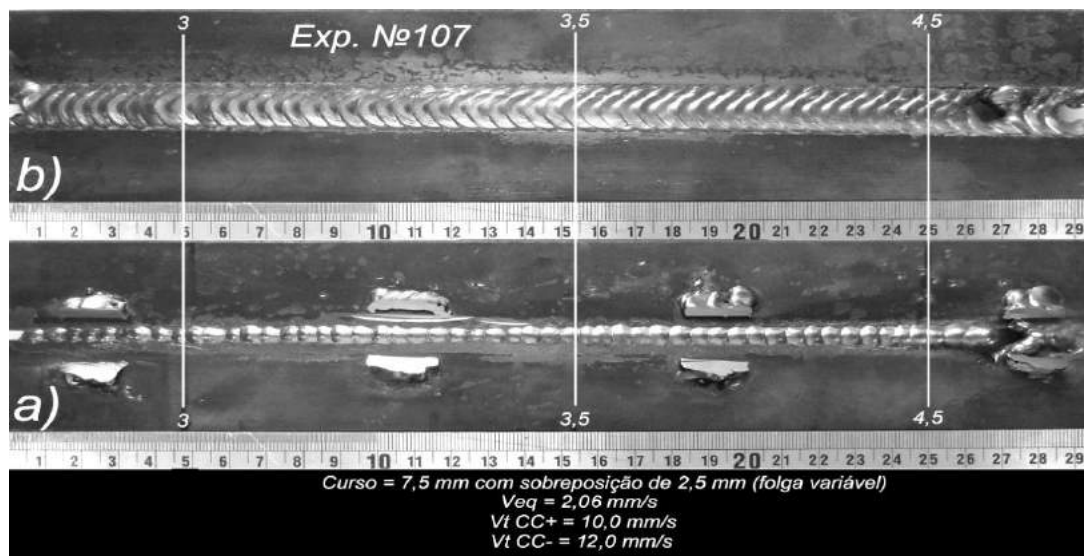


Figura 6.14 – Aspecto do cordão do Experimento 107 com folga variável de 3,0 até 4,5 mm com curso de reversão (*Switch-back*) de 7,5 mm e sobreposição de 2,5 mm e amplitude de 9 mm: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

Tabela 6.5 – Seções transversais do Experimento 107 com desalinhamento (folga variável) para $I_{m+} = 124 \text{ A}$

Desalinhamento (folga variável) (mm)	Seção transversal
3,0	
3,5	
4,0	
4,5	

O Experimento 106, como mostra a Figura 6.13, mostrou que a técnica RMD não teve capacidade de unir adequadamente a junta desnivelada (*high-low*) com variação de 0

até 3,0 mm. Assim, em termos de desnivelamento, a técnica MIG/MAG RSSP se mostrou superior à técnica RMD.

Finalmente, o Experimento 107 (Figura 6.14) mostra que a técnica RMD apresenta bons resultados em juntas desalinhadas com folga variável de 3,0 até 4,5 mm. Se comparado com os resultados obtidos com a técnica MIG/MAG RSSP (Figura 6.7), a técnica RMD, neste caso, mostrou ser superior para superar desalinhamentos e ao mesmo tempo produzir uma face de raiz de melhor qualidade visual. A Tabela 6.4 mostra que as seções transversais deste experimento são bem regulares, apesar da presença de um defeito do tipo cavidade na seção transversal com folga de 4,5 mm.

6.4 – Considerações Finais

Analisando de forma comparativa os cordões que foram soldados pela técnica MIG/MAG RSSP com os produzidos com a técnica RMD, o último mostra melhor estabilidade do arco elétrico, pois não ocorrem mudanças de polaridades, sendo capaz de melhor superar desalinhamentos (folgas variáveis) da junta. Entretanto, a técnica MIG/MAG RSSP mostra-se capaz de superar melhor desnivelamentos (*high-low*) das junta. Desta forma, a ideia de se trabalhar com parâmetros diferenciados em diferentes regiões da junta (maior calor durante a ação do arco nas laterais e menor calor na região central) tem potencial, por ter maior robustez que uma técnica em que os mesmos parâmetros são usados em todas as regiões da junta.

Porém, os resultados mostram que a técnica MIG/MAG RSSP é ainda pouco robusta. Como proposta para aumentar a sua robustez, sugere-se desenvolver uma metodologia para, em função da geometria, dimensões e materiais da junta, encontrar a parametrização (corrente e velocidade da tocha) otimizada para os passes laterais realizados na polaridade positiva (CC+). O ideal seria que durante o ciclo em que a corrente age em CC+ sobre as paredes houvesse fusão de apenas um volume mínimo necessário (grande suficiente para não solidificar antes do passe central, mas não em demasia para favorecer a perfuração pela força da gravidade), sempre localizado nas arestas da raiz (no presente trabalho, muitas vezes a fusão das laterais do chanfro pareceu estar se dando acima da raiz), de tal forma que o curso em CC- apenas feche com material menos aquecido e sob influência de menor pressão do arco as poças formadas nas laterais, como ilustra a Figura 6.15.

Finalmente, é importante ressaltar que a pouca robustez da técnica desenvolvida referente a desalinhamentos pode não ser considerada tão relevante, já que na fabricação de tubulações/duos este tipo de imperfeição de montagem normalmente não acontece, já que a preparação da junta é feita por usinagem (biseladoras). Já o desnivelamento, por outro lado, precisa ser superado pelo processo de soldagem utilizado, como atingido por

esta técnica, já que são oriundos de ovalização dos tubos e dificilmente superados durante etapas de montagem. Mas em outras aplicações, como em tanques, etc, pode ter significância.

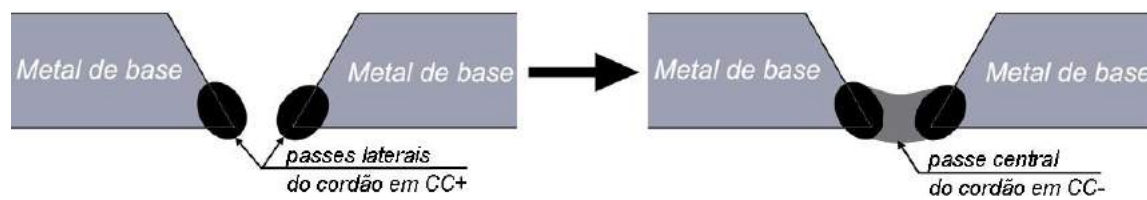


Figura 6.15 – Situação desejada para soldagem com a técnica MIG/MAG RSSP

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

Considerando que o objetivo principal deste trabalho foi tentar controlar a poça de fusão pela distribuição tanto do calor como da pressão do arco/gotas ao longo da junta pela técnica MIG/MAG RSSP (com Reversão Sincronizada do Sentido da Tocha e da Polaridade) e também as condições em que este princípio foi testado, pode-se concluir que:

- É possível controlar a poça de fusão aplicando a polaridade inversa (Pulsado em CC+) nas laterais da junta e a polaridade direta (CCC-) entre essas laterais (no centro da junta), para chanfros com folga maior do que 2 mm, mesmo em juntas com folgas médias de 4 mm, sendo 6 mm um limite em que a técnica encontrou dificuldade para controlar a poça, acontecendo perfuração do cordão;
- A técnica RSSP mostra alta sensibilidade (baixa robustez) em termos de parametrização do processo, porque uma pequena mudança de 0,5 mm/s na velocidade da tocha (V_t), consequentemente na velocidade equivalente (V_{eq}), ou mudança de 1 mm na amplitude de movimento transversal da tocha podem mudar totalmente o acabamento e a qualidade do cordão de solda;
- Existe uma tensa correlação entre os parâmetros de regulação da técnica. Por exemplo, para uma dada amplitude de movimento transversal da tocha existe uma velocidade da tocha adequada. Além disto, a amplitude deve ser maior do que a folga, para permitir a ação do arco em condição de maior força do jato/momentum das gotas nas laterais. Porém, amplitudes muito grandes podem dificultar a penetração, que se faz necessário diminuir a velocidade da tocha para penetrar maior espessura;
- A técnica MIG/MAG RSSP mostra grande robustez quanto a desnivelamento (*high-low*), conseguindo-se soldar, com boa qualidade, até 3 mm, resultados que se

mostrou melhor do que quando comparando com a técnica RMD (*Regulated Metal Deposition*) da *Miller Electric*, recomendada e usada para passes de raiz;

- Porém, a técnica MIG/MAG RSSP mostrou baixa robustez quanto a desalinhamento (variação da abertura de raiz), sendo que um pequeno aumento na folga ($> 0,5$ mm) pode provocar a perfuração e pequena redução ($< 0,5$ mm) falta de fusão ou penetração do cordão de solda (a técnica MIG/MAG RMD (*Regulated Metal Deposition*) da *Miller Electric* tem potencial de superar maiores valores de desalinhamento do que a técnica MIG/MAG RSSP).

Desta forma, a técnica MIG/MAG RSSP mostrou potencial para a soldagem automatizada de passes de raiz sem o suporte de cobrejunta, por permitir um melhor controle da poça de fusão, mas maiores estudos precisam ser implementados para aumentar a robustez da abordagem, uma vez que o desempenho é ainda muito sensível a pequenas variações da geometria da junta, o que reduz a praticidade de sua aplicação.

CAPÍTULO VIII

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de complementar os estudos da avaliação da técnica MIG/MAG RSSP (MIG/MAG com Reversão Sincronizada do Sentido da Tocha e da Polaridade) para o controle da estabilidade da poça de fusão em soldagem MIG/MAG, de tal forma a se permitir soldagens automatizadas de passes de raiz, apresentam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Estudar o efeito do ângulo de ataque sobre o controle da poça de fusão, com a finalidade de encontrar a melhor angulação da tocha (puxando ou empurrando) na soldagem pela técnica de soldagem MIG/MAG RSSP;
- Realizar soldagens na vertical, horizontal e sobrecabeça, com uma inclinação adequada da tocha, visando encontrar pacotes operacionais da técnica de soldagem MIG/MAG RSSP para a soldagem de tubulações/dutos (soldagem orbital), em diferentes aberturas de raiz (0 a 4 mm, por exemplo). No caso de não se encontrar um pacote operacional genérico para todas as posições, ou que o mesmo tenha baixa robustez, avaliar o uso de sensor para detectar o posicionamento da tocha ao longo da órbita desenvolvida sobre o tubo, para permitir que o pacote operacional mais adequado seja utilizado em cada posição;
- Realizar a otimização das soldagens em orbital (em tubo) para permitir superar a deficiência de baixa robustez da técnica principalmente quanto à desalinhamento da abertura de raiz que ocorrem ao longo da junta. Para isso, seriam utilizados sensores (pode-se colocar à frente da tocha um sensor, a laser, por exemplo) para captar essas variações e desalinhamentos e permitir, em rápida resposta, a mudança dos pacotes operacionais das velocidades e de amplitude, para uma determinada abertura de raiz;

- Estudar vantagens e desvantagens da troca do processo para soldagens nas laterais da junta (MIG/MAG Pulsado) pela técnica de soldagem Curto-Circuito Controlado na polaridade positiva (CCC+), para adicionar menos calor e evitar perfurações na raiz;
- Fazer filmagens com a câmera termográfica pelo lado oposto da chapa (lado da raiz) para verificar o comportamento térmico durante as mudanças entre as fases de Pulsado em CC+ e CCC-, na soldagem com a técnica MIG/MAG RSSP;
- Fazer filmagens com iluminação a laser e câmera de alta velocidade (perfilografia sincronizada) para observar e entender o comportamento do arco e da transferência metálica durante as soldagens com a mudança entre as polaridades inversa (CC+) e direta (CC-), na soldagem com a técnica MIG/MAG RSSP;
- Verificar se o afundamento da poça em chanfro é suficiente para ser detectado pelo processo CCC, seja por aumento da tensão ou potência pela redução de frequência dos curtos-circuitos (uma melhoria do sistema seria reduzir a corrente, de forma adaptativa, quando a poça aprofunda);
- Avaliar o uso de uma técnica de soldagem em que haveria dois arames paralelos, com tecimento transversal em pequenas amplitudes, aplicando a reversão do arco, cada um agindo sobre uma face do chanfro, sem a necessidade de passar para o outro lado, mas depositando material suficiente para ligar as duas arestas do chanfro.

CAPÍTULO IX

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, O. P.; MAYER, G. R. G. Internal pipe aligning clamp. United States Patent, **Patent** N. US 2615414 (A). Out. 1952

ANDERSSON, B. H.; KNIPSTROM, K.-E.; MALM, A. L. Method for tube welding, United States Patent, **Patent** N. US 4142085 (A). Fev. 1979

BALLIS, W.; CHEW, C.; CHURCHHEUS, C.; GWIN, R.; HALL, A.; HUTT, B. Lineup clamp and backup device, United States Patent, **Patent** N. US 3741457 (A). Jun. 1973

BARRY, F. F. Lineup clamp for pipe, United States Patent, **Patent** N. US 3422519 (A). Jan. 1969

BELLONI, A.; BONASORTE R. Apparatus and method for welding pipes together, United States Patent, **Patent** N. US 6429405 (B2). Ago. 2002

BRACARENSE, A. Q.; FELIZARDO, I.; RAMAL, F. A. JUNIOR; LIMA, E. J.; FORTU TORRES, G. C. Robotic system for orbital welding of pipelines, International Publication, **Patent** N. WO 2006/037200 (A1). Abr. 2006

CHANG, N. M.; RENSHAW, R. Automatic pipe welding apparatus and method, United States Patent, **Patent** N. US 4216896 (A). Ago. 1980

CHIBA, Y.; IMAI, K.; KANIYA, J.; MASSAOKA, I. Method of cooling weld in steel piping and apparatus therefor, United States Patent, **Patent** N. US 4223197 (A). Set. 1980

CLARK, J. Apparatus for aligning pipe ends, United States Patent, **Patent** N. US 3425614 (A). Fev. 1969

CLARK, J. Apparatus for aligning pipe ends, United States Patent, **Patent** N. US 3920232 (A). Nov. 1975

COSTA, T. F. **Aplicação de Processos MAG Curto-circuito Convencional e Controlado na Solagem de Dutos de Aço Carbono**. 2011. 197 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia

CUNNINGHAM, J. A.; WHITE, J. L. Internal pipe clamp with weld backup, United States Patent, **Patent** N. US 3937382 (A). Fev. 1976

DIERLAM, O. T. Plug style pipe line-up clamp with copper back-up shoes, United States Patent, **Patent** N. US 5597108 (A). Jan. 1997

DIEZ, F. M.; STUMP, K. S.; LUDEWIG, H. W.; KITTY, A. L.; ROBINSON, M. M.; EGLAND, K. M. Dual wire welding torch and method, United States Patent, **Patent** N. US 7525067 (B2). Abr. 2009

DOYLE, T. E.; NOEL, C. D.; BREAU, T. L.; PETERS, S. R. Method to improve the characteristics of a root pass pipe weld, United States Patent, **Patent** N. US 2009/0321402 (A1). Dez. 2009

EDMUND, B. G.; REGINALD W. P. Internal line-up clamp for pipe lines, United States Patent, **Patent** N. US 3699635 (A). Out. 1972

FAFARD, P.; NADEAU, F.; PATENAUDE, G.; TREMBLAY, J. Method and apparatus for controlling root pass weld penetration in open butt joints, United States Patent, **Patent** N. US 4733051 (A). Mar. 1988

HASEGAWA, H.; MIYAGAWA, K.; NAKAYAMA, S.; TANAKA, M. Root pass bead welding method, United States Patent, **Patent** N. US 5202546 (A). Abr. 1993

HIROICHI, N.; YUKIHIKO, S.; YOSHIKAZU S. One-side butt welding method of pipe by inert gas tungsten arc welding, European Patent Specification, **Patent** N. JPS5970480 (A). Abr. 1984

HIROSHI, M.; MOTOJI, T.; SATOSHI, O. Arc welding method, European Patent Specification, **Patent** N. JPS5550974 (A). Abr. 1980

HIRSCH, D. J.; PILLARD, M. M. Pipe clamping device, United States Patent, **Patent** N. US 5583305 (A). Dez. 1996

IMC SOLDAGEM. **Manual de Instruções DIGIPlus A7**. p 88. 2012.

IMC SOLDAGEM. **Manual de Instruções STA-20**. p 13. 2005.

JOHN, S. W.; ERVAN H. W. Internal expanding line-up pipe clamp, United States Patent, **Patent** N. US 3197195 (A). Jul. 1965

JONES, R. L. Resilient lineup clamp, United States Patent, **Patent** N. US 5090608 (A). Fev. 1992

KANEDO, Y; MAEKAWA, Y; YAMANE, S e OSHIMA, K. Numerial Simulation of MIG/MAG Weld Pool in Switch-Back Welding. **IIW**. Doc 212-1106-07.

KANEYAMA, K.; MURAKAMI, T.; NAKAMURA, M. Clamping mechanism for line-up of pipes, United States Patent, **Patent** N. US 3979041 (A). Set. 1976

KOVALENKO, O. MIG/MAG com APSTT (Alternância de Polaridade Sincronizada com Tecimento Transversal) Visando Automação da Soldagem do Passe de Raiz em Tubulações. 2014. 148 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

LAFORCE, J. Clamping method and apparatus for solid phase welding, United States Patent, **Patent** N. US 4418860 (A). Dez. 1983

LEDUC, T. Internal line up clamp, United States Patent, **Patent** N. US 5356067 (A). Out. 1994

LEON, F. P. Outside pipe lineup clamp, United States Patent, **Patent** N. US 3512229 (A). Mai. 1970

MASAKATSU, U.; SHUNJI, I. Single side welding method of conduit and pipe, European Patent Specification, **Patent** N. JP2003048067 (A). Fev. 2003

MICHIHARU, Y.; YUJI, Y.; TADASHI, M. One-side welding procedure, European Patent Specification, **Patent** N. JPH 03180275 (A). Ago. 1991

MIRANDA, H. C.; SCOTTI, A.; FERRARESI, V. A. Identification and control of metal transfer in pulsed GMAW using optical sensor. **Science and Technology of Welding & Joining - Maney Publishing**. v 12, n 3, p 249-257, may. 2007.

MURAYAMA, M.; SUGITANI, Y. Method for one-side root pass welding of a pipe joint, United States Patent, **Patent** N. US 5030812 (A). Jul. 1991

NASCIMENTO, A. S.; FERNANDES, D. B.; MOTA, C. A. M.; VILARINHO, L. O. Metodologia para determinação de parâmetros para soldagem MIG com polaridade variável. **Soldagem & Inspeção**. São Paulo, v 13, n 2, p. 97-104, abr./jun. 2008

NATIONAL INSTRUMENTS. **Documento das especificações, modelo NI USB-6009**. 2012

PARKER, W. D. Method of welding pipe, International Publication, **Patent** N. WO 1998015378 (A1). Abr. 1998

PETERS, S. R. Method and system to increase heat input to a weld during a short-circuit arc welding process, United States Patent, **Patent** N. US 8373093 (B2). Jun. 2008

RICHARD, S.; RICHARD, G. Welding arc penetrating power real-time detection system, United States Patent, **Patent** N. US 6518545 (B1). Fev. 2003

RINALDI, F. Weld supporting ring for pipes, United States Patent, **Patent** N. US 5110031 (A). Mai. 1992

RIYOUICHI, I.; SUTETO, H.; KIYOSHI, I. Method for welding tubular member, European Patent Specification, **Patent** N. JPS58154487 (A). Set. 1983

ROBERT, L. L.; JOHN S. W. Internal pipe lineup clamp, United States Patent, **Patent** N. US 3633813 (A). Jan. 1972

ROEN, R. A. Arc welding apparatus with oscillating electrode, United States Patent, **Patent** N. US 4295031 (A). Out. 1981

ROGERS, D. Lineup clamp, United States Patent, **Patent** N. US 3400872 (A). Set. 1968

SCOTTI, A.; FERRARESI, V. A.; MIRANDA, H. C. Luminescence sensing system for welding, United States Patent, **Patent** N. US 20040034608 (A1). Fev. 2004

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG**. Artliber Ed, 2008. 284p.

SCULLY, C. D.; WILSON, D. F. Size-adjustable internal pipe clamp apparatus, United States Patent, **Patent** N. US 4140262 (A). Fev. 1979

STAVA, E. K.; HSU, C.; NICHOLSON, P. Method and apparatus for electric arc welding, European Patent Specification, **Patent** N. EP 1036627 (B1). Ago. 2006

STAVA, E. K.; MYERS R. K. System and method for pulse welding, United States Patent, **Patent** N. US 7271365 (B2). Set. 2007

TAKAO, N.; KUNIO, S. Weaving welding method, European Patent Specification, **Patent** N. JPS5741886 (A). Mar. 1982

TAKESHI, T.; TERUHIKO, H. Circumferential welding method for double pipes, European Patent Specification, **Patent** N. JPH 03207575 (A). Sep. 1991

TALKINGTON, B. S. **Variable polarity gas metal arc welding**. 1998. 113 f. Dissertação de Mestrado - The Ohio State University, Columbus, USA.

VALENTINE, L. T. Vacuum supply for internal pipeline line-up clamp seal space, United States Patent, **Patent** N. US 3458106 (A). Jul. 1969

VERNI, J. C. Automatic arc welding, United States Patent, **Patent** N. US 1667585 (A). Abr. 1928

WILLIAM, L. B. Automatic pipeline welding method, United States Patent, **Patent** N. US 3668360 (A). Jun. 1972

YAMANE, S.; YOSHIDA, T. e YAMAMOTO, H. Torch Weaving and Feed-Forward Control of Back Bead in One Side Backing less V Groove Welding by using Switch-Back Welding. **IIW**. Doc XII-1931-07.

Apêndice I

Determinação do volume máximo depositado nas laterais da junta com abertura de raiz de 6 mm

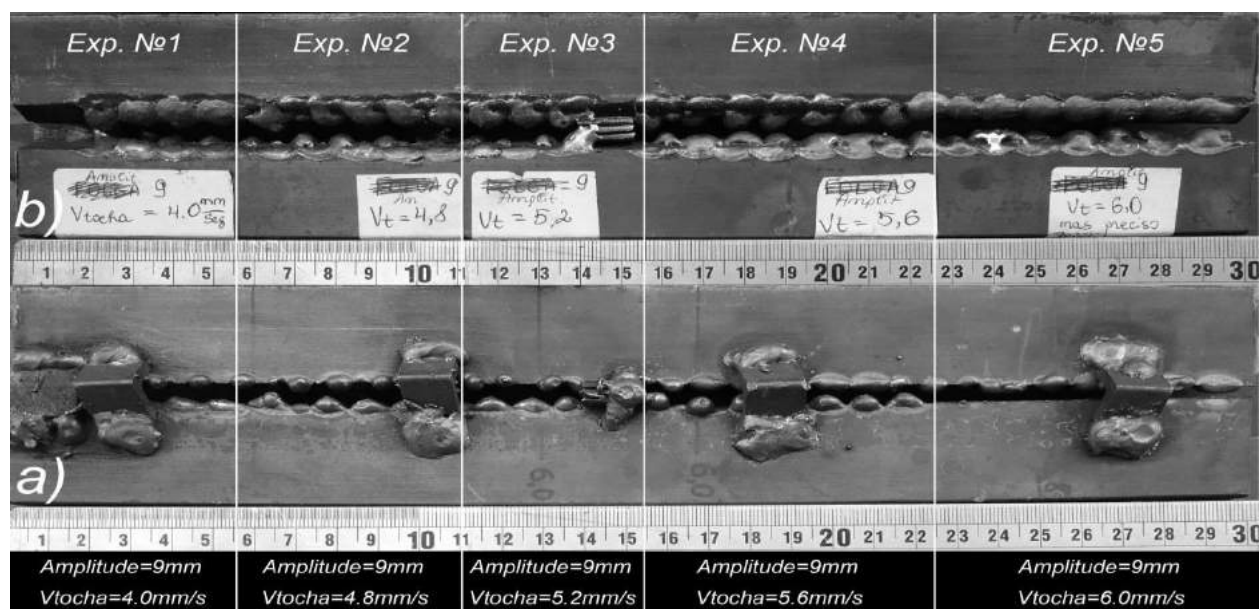


Figura A1.1 – Aspecto dos cordões dos Experimentos de 1 até 5 com MIG/MAG com técnica *Switch-back* (avanço e reversão de 10 mm), mas com arco aberto apenas nas laterais da junta e em polaridade CC+. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

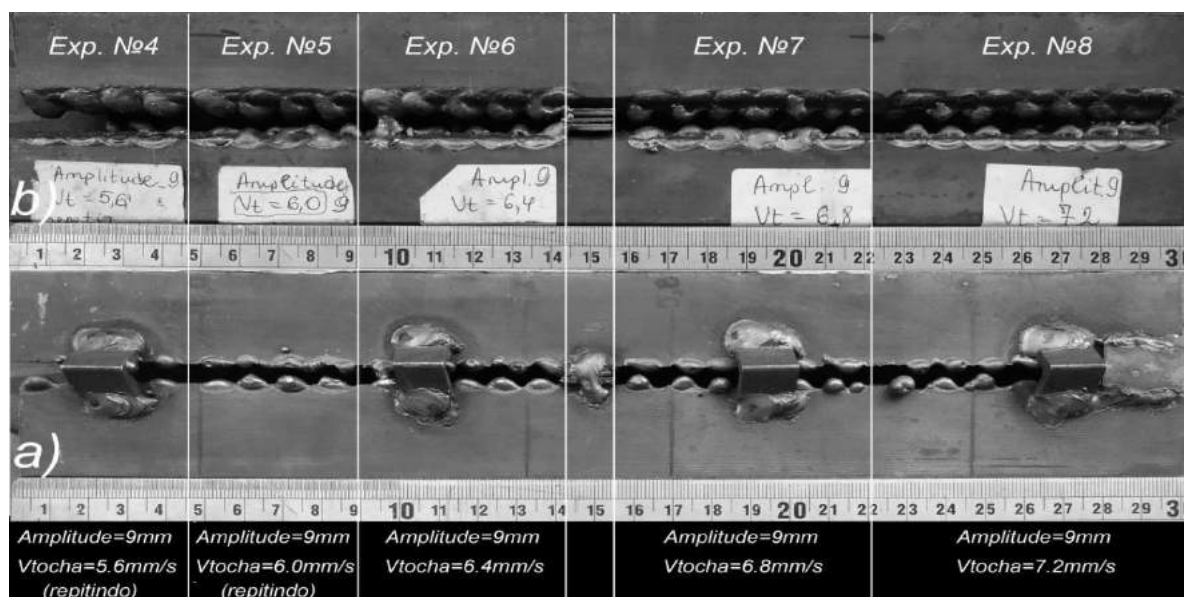


Figura A1.2 – Aspecto dos cordões dos Experimentos 4 e 5 (repetições) e dos experimentos 6 até 8 com MIG/MAG com técnica *Switch-back* (avanço e reversão de 10 mm), mas com arco aberto apenas nas laterais da junta e em polaridade CC+. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

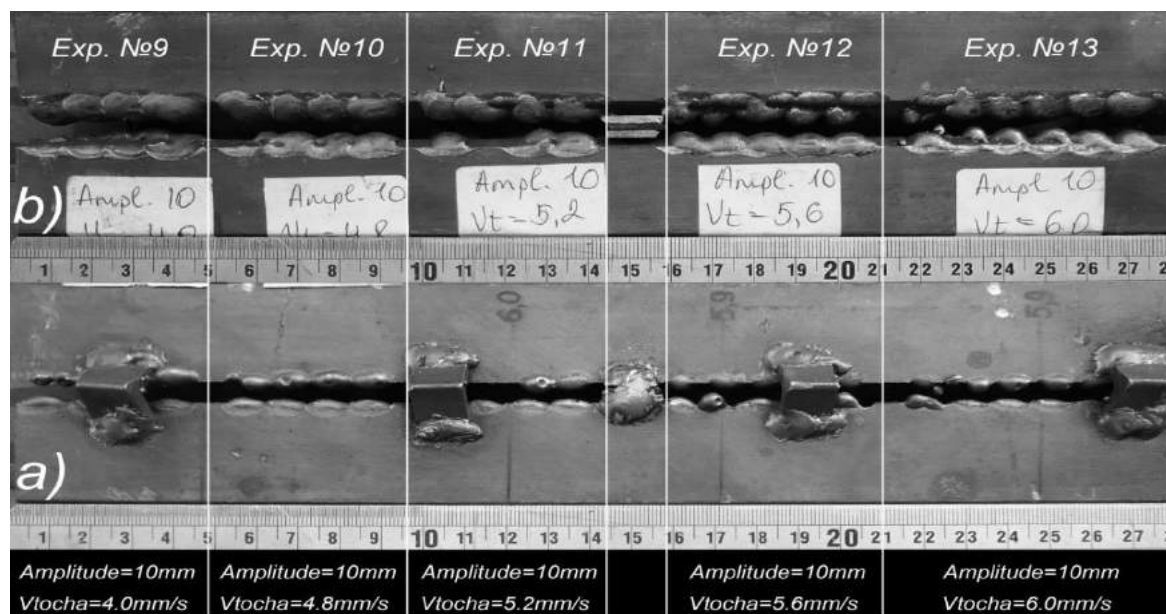


Figura A1.3 – Aspecto dos cordões dos Experimentos de 9 até 13 com MIG/MAG com técnica *Switch-back* (avanço e reversão de 10 mm), mas com arco aberto apenas nas laterais da junta e em polaridade CC+. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

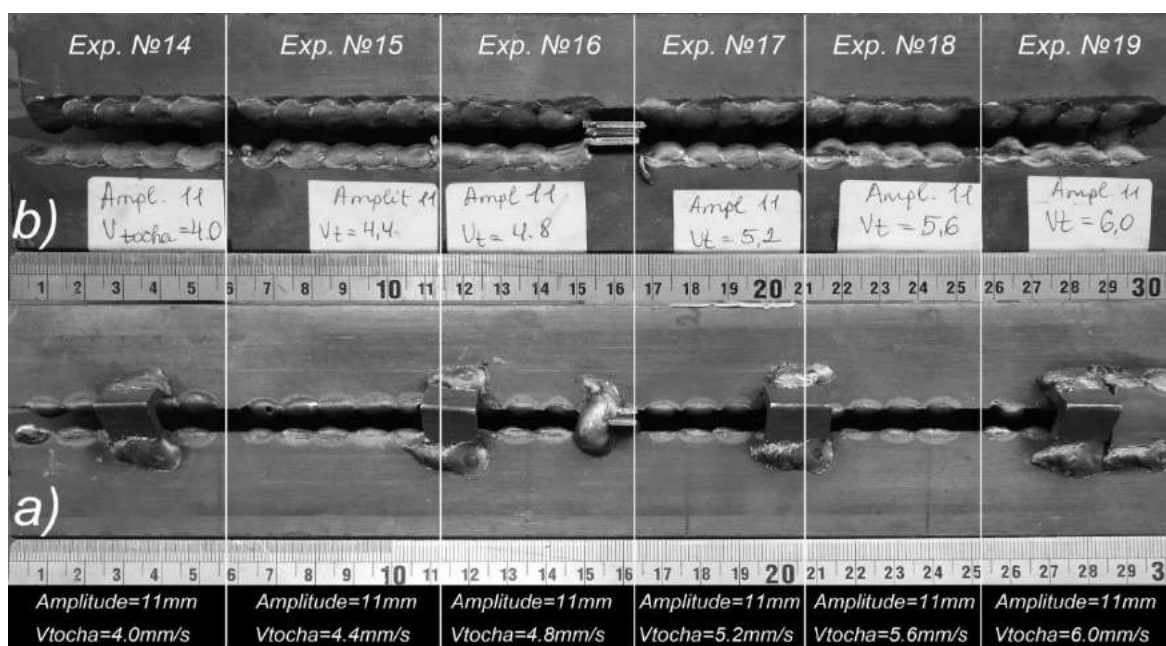


Figura A1.4 – Aspecto dos cordões dos Experimentos de 14 até 19 com MIG/MAG com técnica *Switch-back* (avanço e reversão de 10 mm), mas com arco aberto apenas nas laterais da junta e em polaridade CC+. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

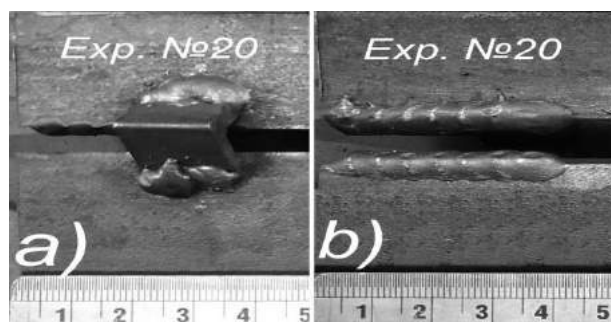


Figura A1.5 – Aspecto do cordão do Experimento 20 com MIG/MAG com técnica *Switch-back* (avanço e reversão de 10 mm), mas com arco aberto apenas nas laterais da junta e em polaridade CC+. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

Para a amplitude de 9 mm, Figuras A1.1 e A1.2, é possível observar que as velocidades da tocha que favoreceram cordões mais adequados dentro dos critérios de análise visual foram 5,6 e 6,0 mm/s. De forma geral, essa amplitude não mostrou bom resultado, provavelmente porque não há muito espaço disponível nas paredes da junta para sustentar o material depositado.

Para a amplitude de 10 mm, Figura A1.3, é possível observar que a faixa de velocidade da tocha mais adequada parece ser de 4,8 a 5,2 mm/s. A amplitude de 10 mm mostrou melhor resultado em relação à de 9 mm, já que agora as paredes da junta oferecem mais espaço para acomodar o material depositado.

Para a amplitude de 11 mm, Figura A1.4, a velocidade mais adequada parece estar entre 4,4 e 4,8 mm/s. Esta amplitude mostrou resultados similares aos obtidos com 10 mm, com fusão (penetração) total dos chanfros e sem tendência de escorrimento de metal fundido, já que neste caso também há espaço suficiente para acomodar o metal depositado.

Para a amplitude 12 mm, Figura A1.5, não foi possível definir valores de velocidade da tocha adequados, pois neste caso o material depositado se concentrou na parte superior das paredes da junta (afastado da raiz), consequência da posição de deposição.

Apêndice II

Determinação do volume máximo depositado no centro da junta com abertura de raiz de 6 mm e amplitude de 10 mm

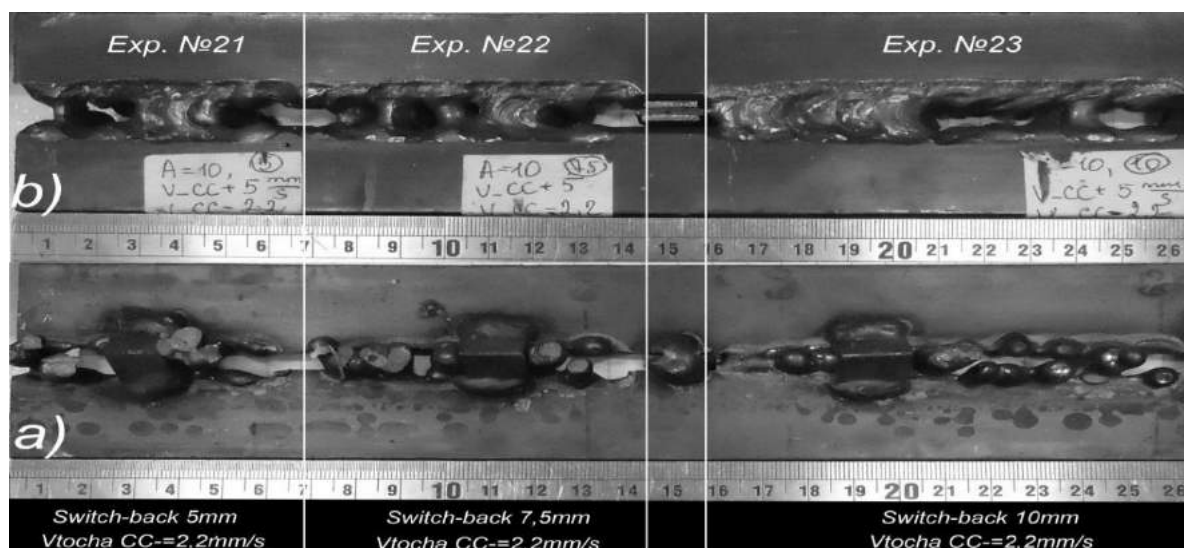


Figura A2.1 – Aspecto dos cordões dos Experimentos de 21 até 23 com MIG/MAG com técnica *Switch-back* com arco aberto nas laterais da junta em polaridade CC+ e no meio da junta em polaridade CC-. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

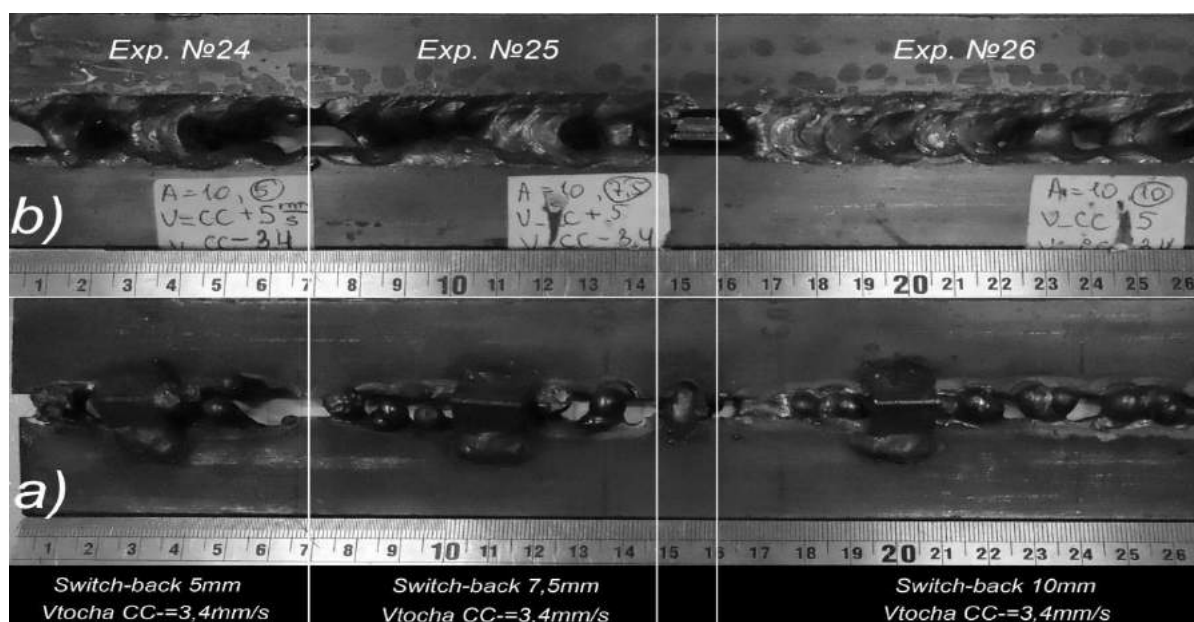


Figura A2.2 – Aspecto dos cordões dos Experimentos de 24 até 26 com MIG/MAG e técnica *Switch-back* com arco aberto nas laterais da junta em polaridade CC+ e no meio da junta em polaridade CC-. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

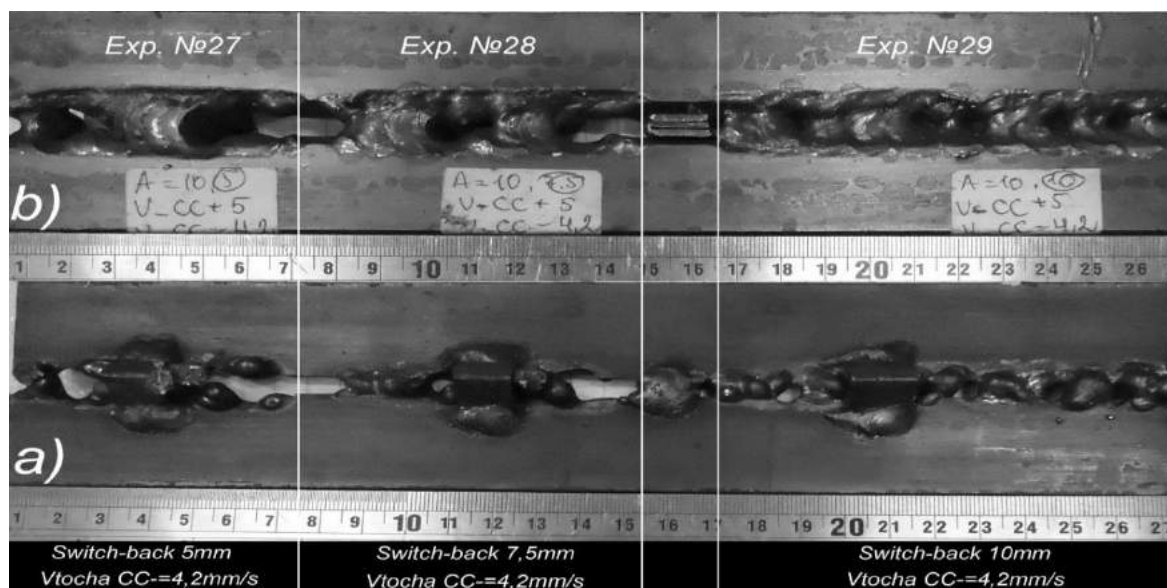


Figura A2.3 – Aspecto dos cordões dos Experimentos de 27 até 29 com MIG/MAG e técnica *Switch-back* com arco aberto nas laterais da junta em polaridade CC+ e no meio da junta em polaridade CC-. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

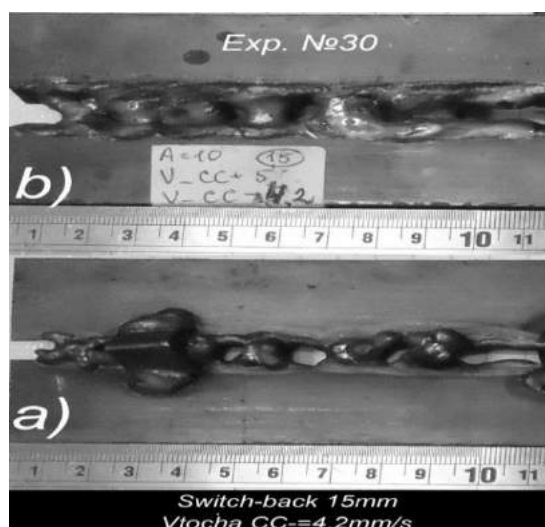


Figura A2.4 – Aspecto do cordão do Experimento 30 com MIG/MAG e técnica *Switch-back* com arco aberto nas laterais da junta em polaridade CC+ e no meio da junta em polaridade CC-. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

Apêndice III

Determinação do volume máximo depositado no centro da junta com abertura de raiz de 6 mm e amplitude de 11 mm

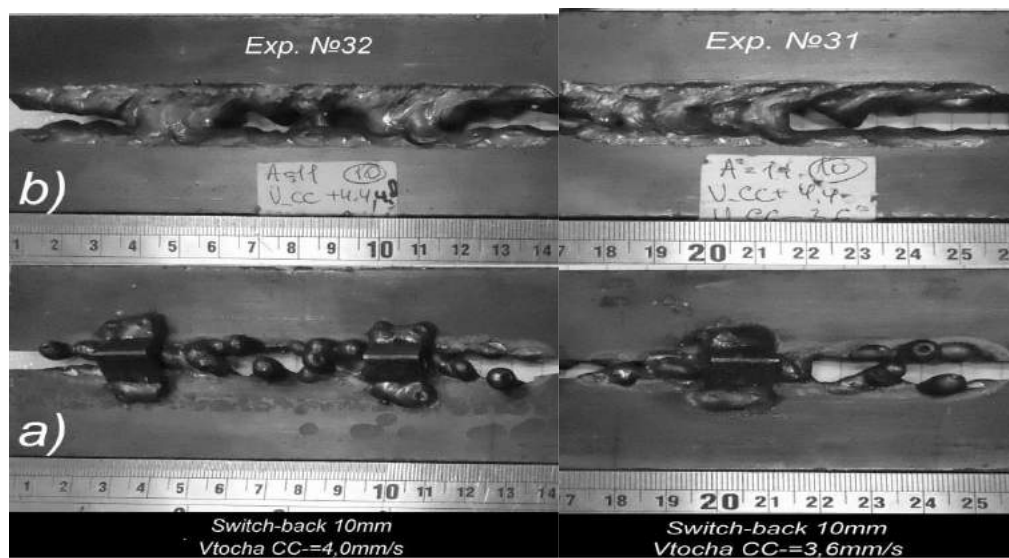


Figura A3.1 – Aspecto dos cordões dos Experimentos de 31 e 32 com MIG/MAG e técnica *Switch-back* com arco aberto nas laterais da junta em polaridade CC+ e no meio da junta em polaridade CC-. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

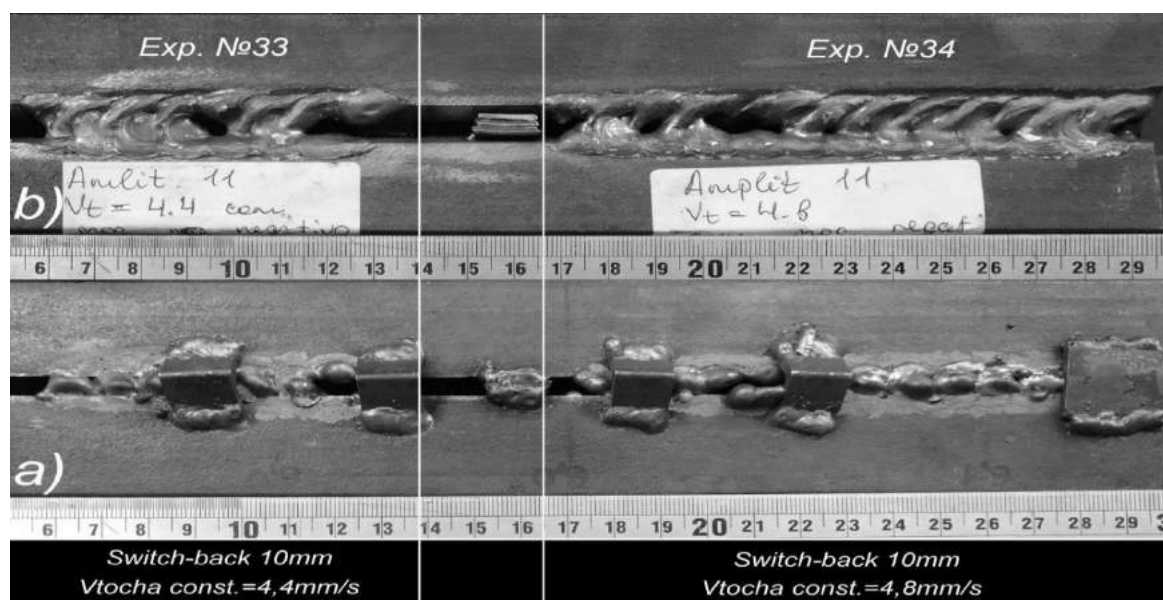


Figura A3.2 – Aspecto dos cordões dos Experimentos de 33 e 34 com MIG/MAG e técnica *Switch-back* com arco aberto nas laterais da junta em polaridade CC+ e no meio da junta em polaridade CC-. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

Apêndice IV

Determinação do volume máximo depositado no centro da junta com abertura de raiz de 6 mm e amplitude de 12 mm

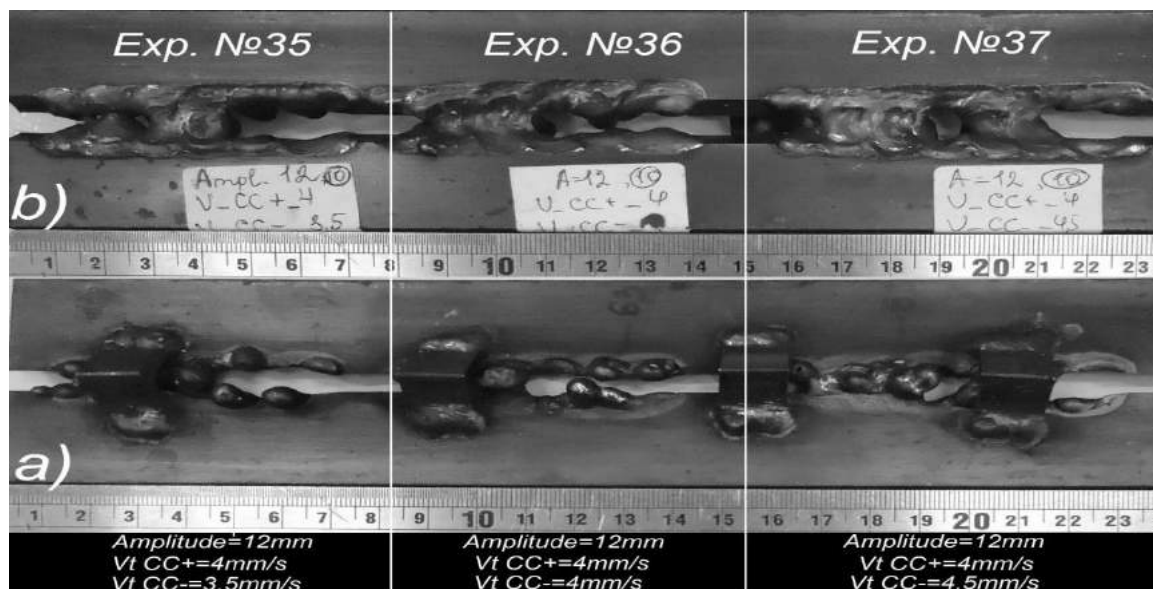


Figura A4.1 – Aspecto dos cordões dos Experimentos de 35 até 37 com MIG/MAG e técnica *Switch-back* com arco aberto nas laterais da junta em polaridade CC+ e no meio da junta em polaridade CC-. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

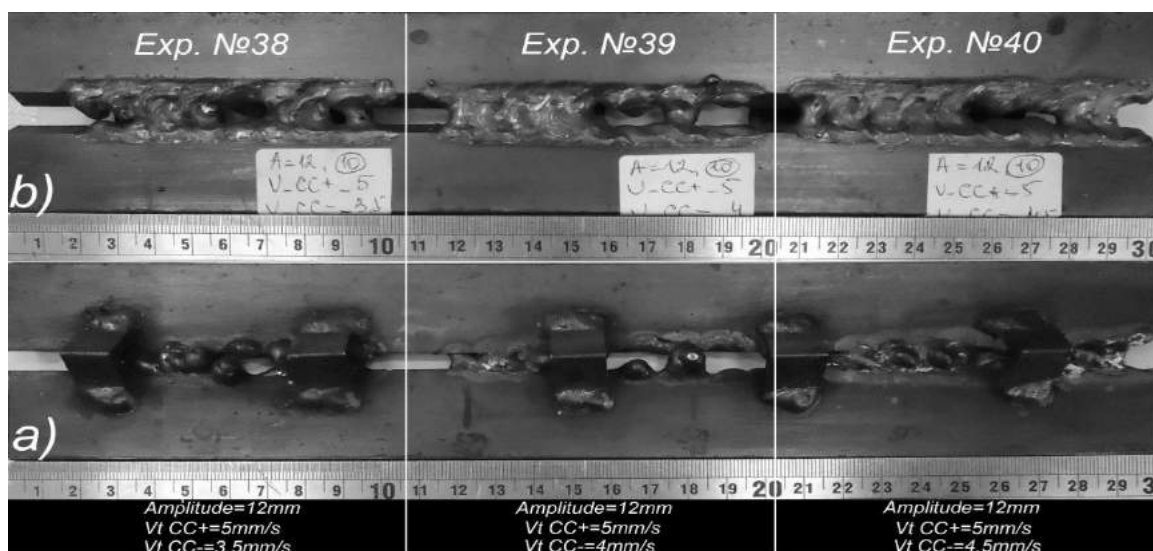


Figura A4.2 – Aspecto dos cordões dos Experimentos de 38 até 40 com MIG/MAG e técnica *Switch-back* com arco aberto nas laterais da junta em polaridade CC+ e no meio da junta em polaridade CC-. a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

Apêndice V

Influência do aumento da corrente média nas laterais da junta (CC+) e troca do gás de proteção

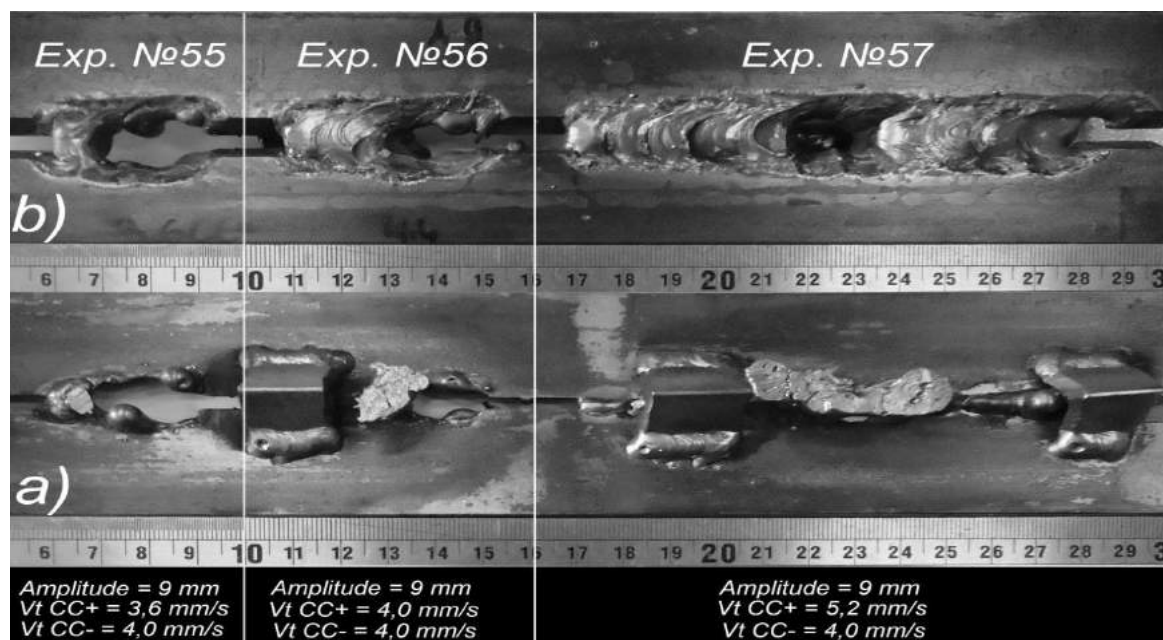


Figura A5.1 – Aspecto dos cordões dos Experimentos 55, 56 e 57 com VtCC+ de 3,6 mm/s (Veq de 0,93 mm/s), 4,0 mm/s (Veq de 1,01 mm/s), 5,2 mm/s (Veq de 1,21 mm/s), respectivamente: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

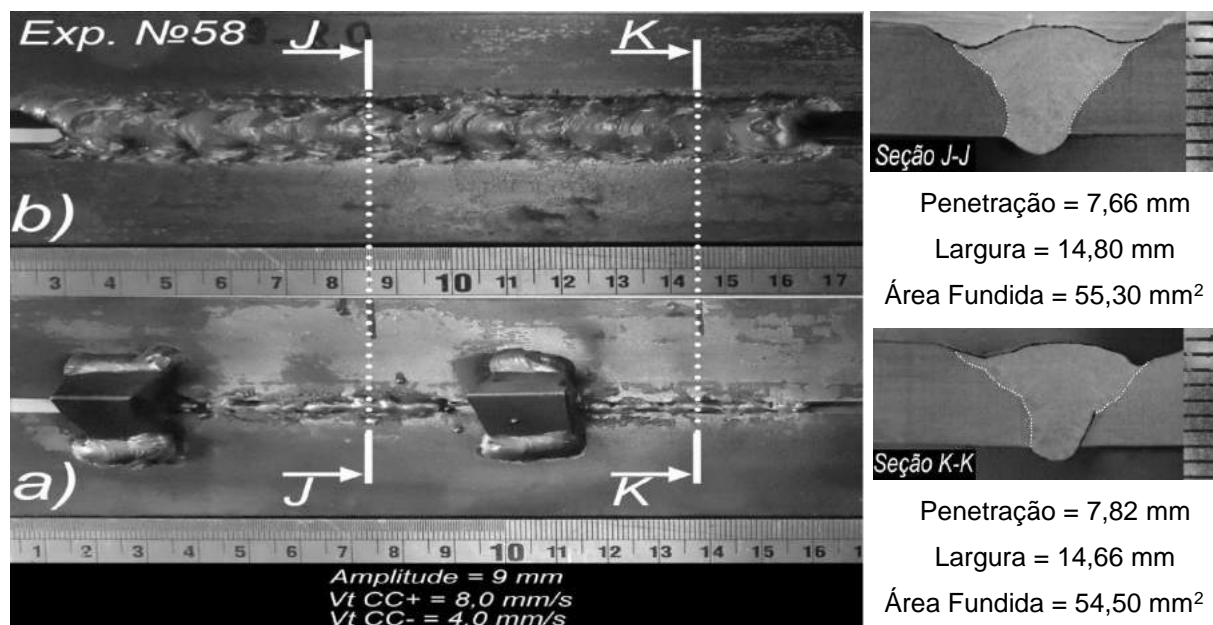


Figura A5.2 – Aspecto do cordão do Experimento 58 com VtCC+ de 8,0 mm/s e Veq de 1,58 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

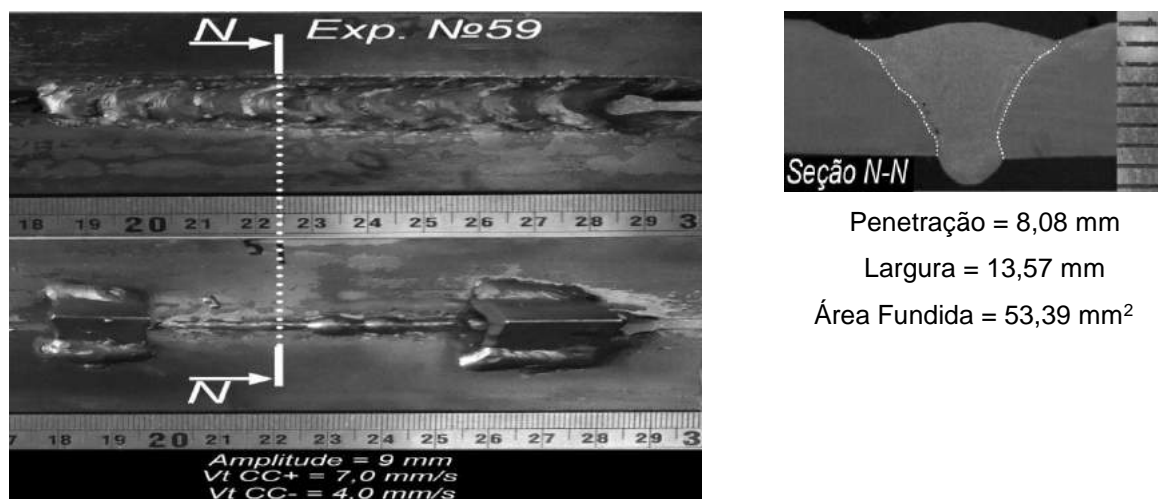


Figura A5.3 – Aspecto do cordão do Experimento 59 com VtCC+ de 7,0 mm/s e Veq de 1,46 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

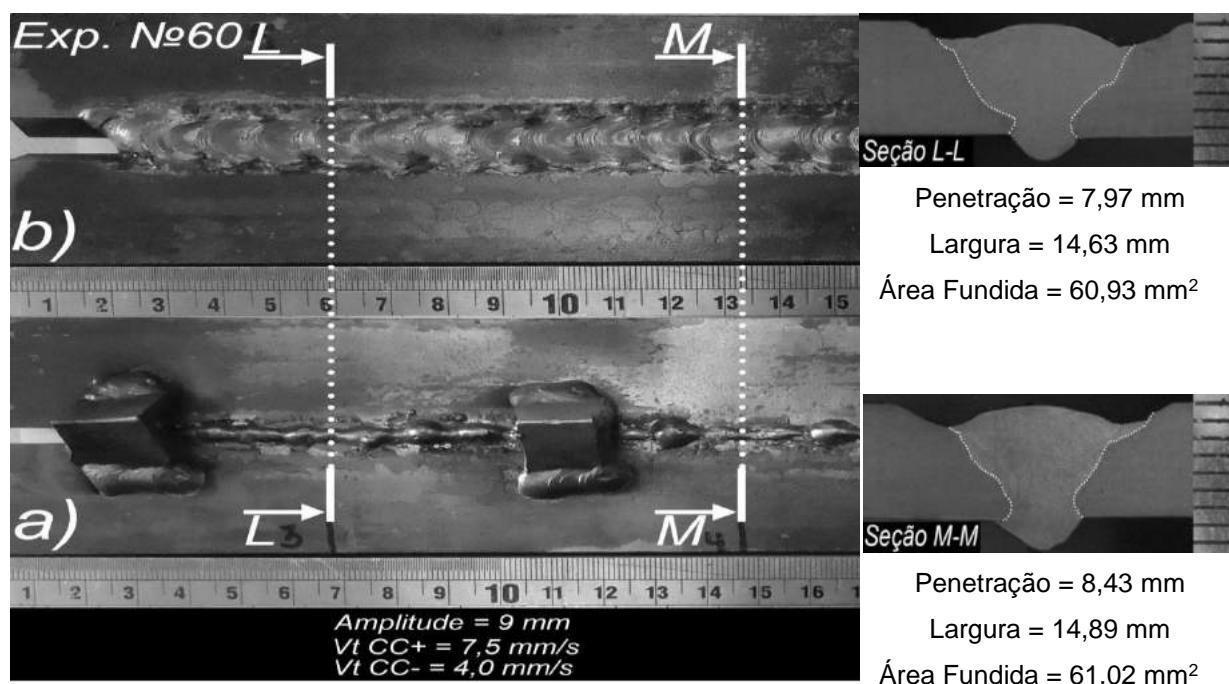


Figura A5.4 – Aspecto do cordão do Experimento 60 com VtCC+ de 7,5 mm/s e Veq de 1,52 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

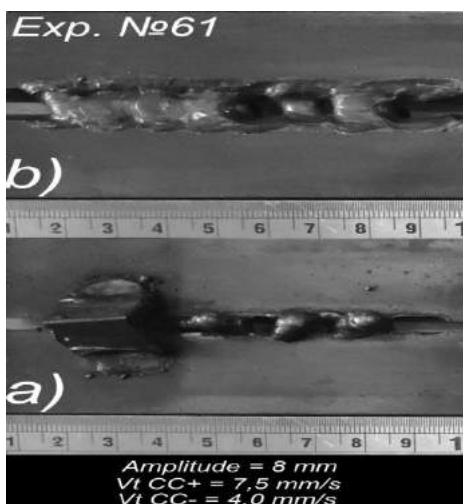
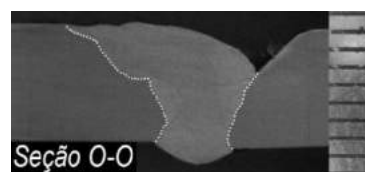
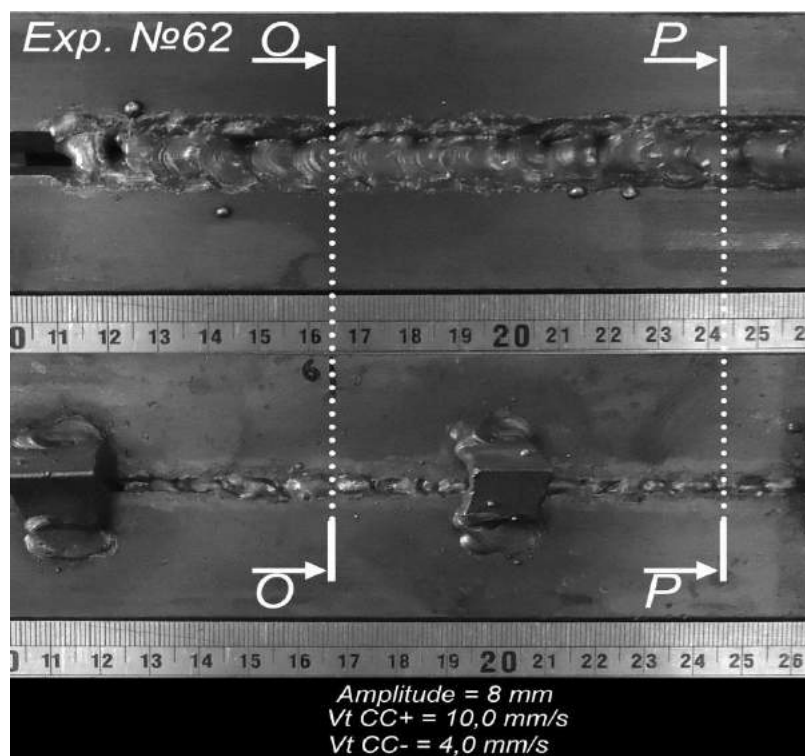
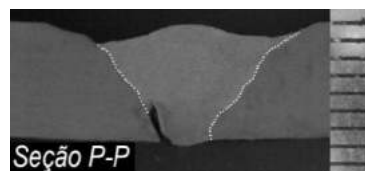


Figura A5.5 – Aspecto do cordão do Experimento 61 com VtCC+ de 7,5 mm/s e Veq de 1,55 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)



Penetração = 7,83 mm
Largura = 13,45 mm
Área Fundida = 52,06 mm²



Penetração = 6,94 mm
Largura = 13,64 mm
Área Fundida = 47,53 mm²

Figura A5.6 – Aspecto do cordão do Experimento 62 com VtCC+ de 10,0 mm/s e Veq de 1,82 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

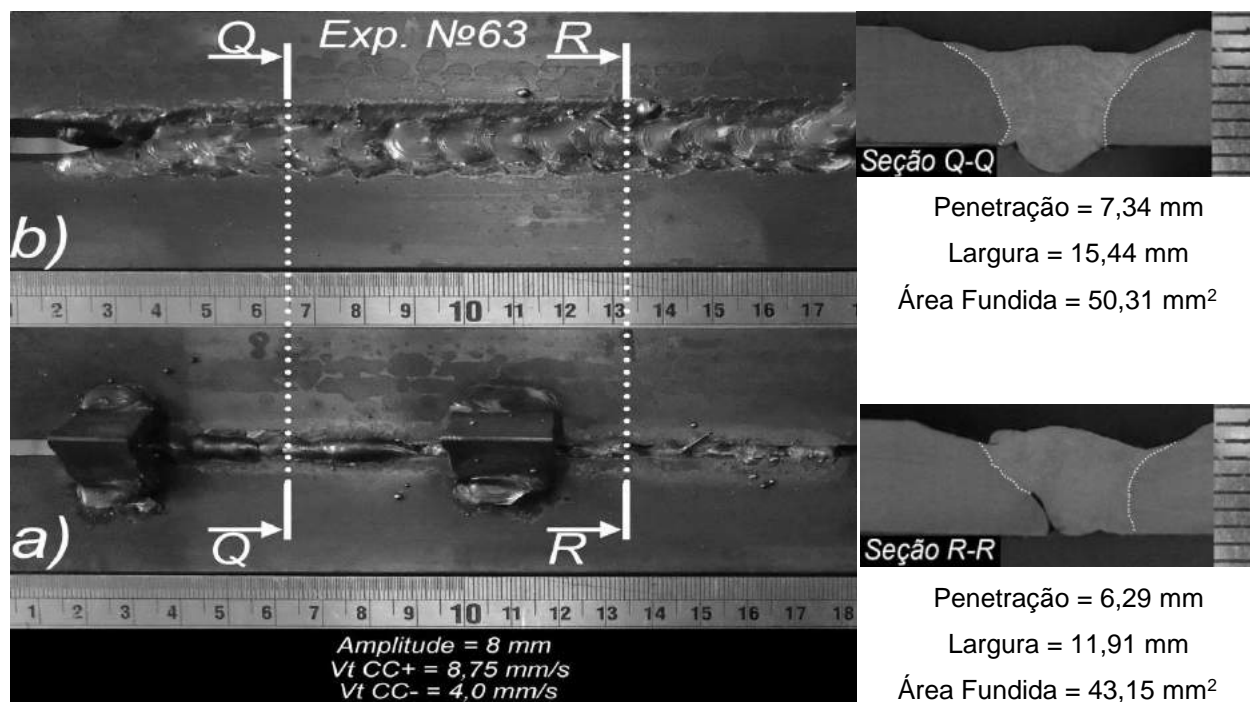


Figura A5.7 – Aspecto do cordão do Experimento 63 com VtCC+ de 8,75 mm/s e Veq de 1,69 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

Apêndice VI

Influência do curso da trajetória do *Switch-back* sobre a formação do cordão de solda para uma abertura de raiz (folga) de 4 mm

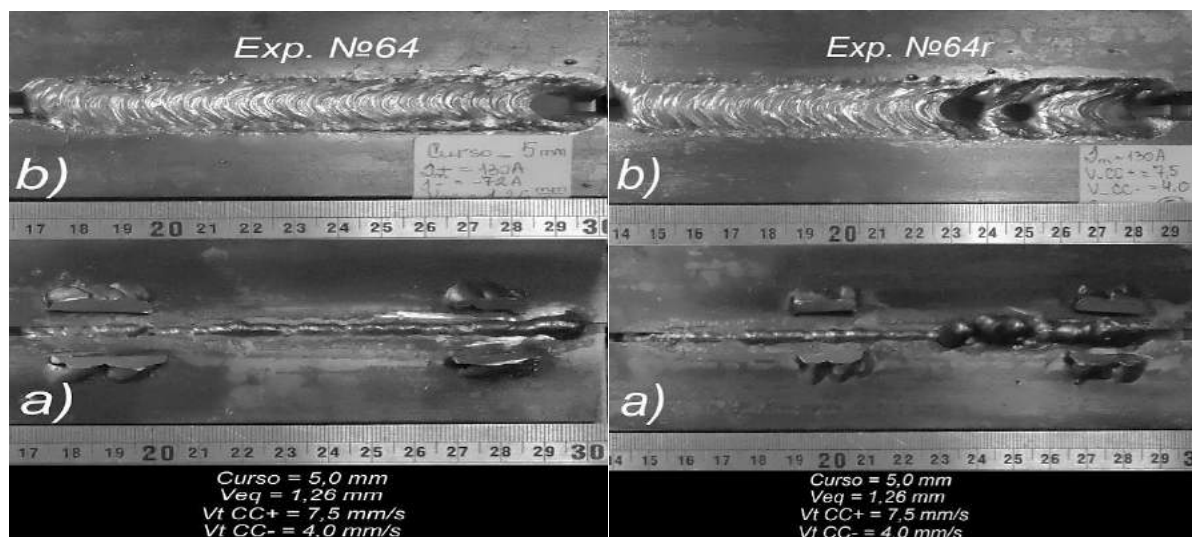


Figura A6.1 – Aspecto dos cordões dos experimentos 64 e 64r (réplica) com curso de 5,0 mm, VtCC+ de 7,5 mm/s e VtCC- de 4,0 mm/s (Veq de 1,26 mm/s), respectivamente: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

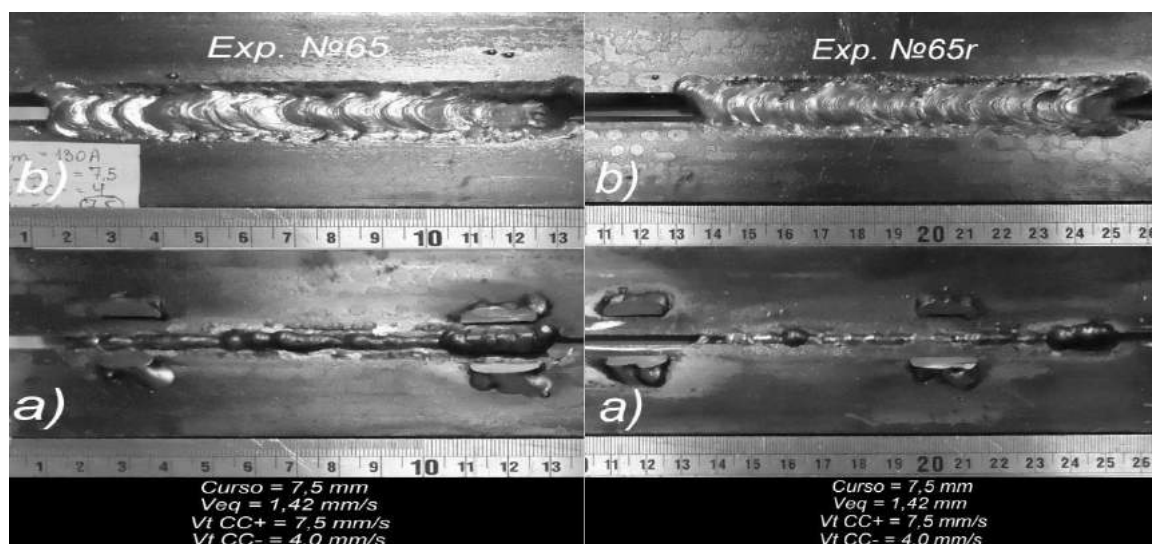


Figura A6.2 – Aspecto dos cordões dos experimentos 65 e 65r (réplica) com curso de 7,5 mm, VtCC+ de 7,5 mm/s e VtCC- de 4,0 mm/s (Veq de 1,42 mm/s), respectivamente: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

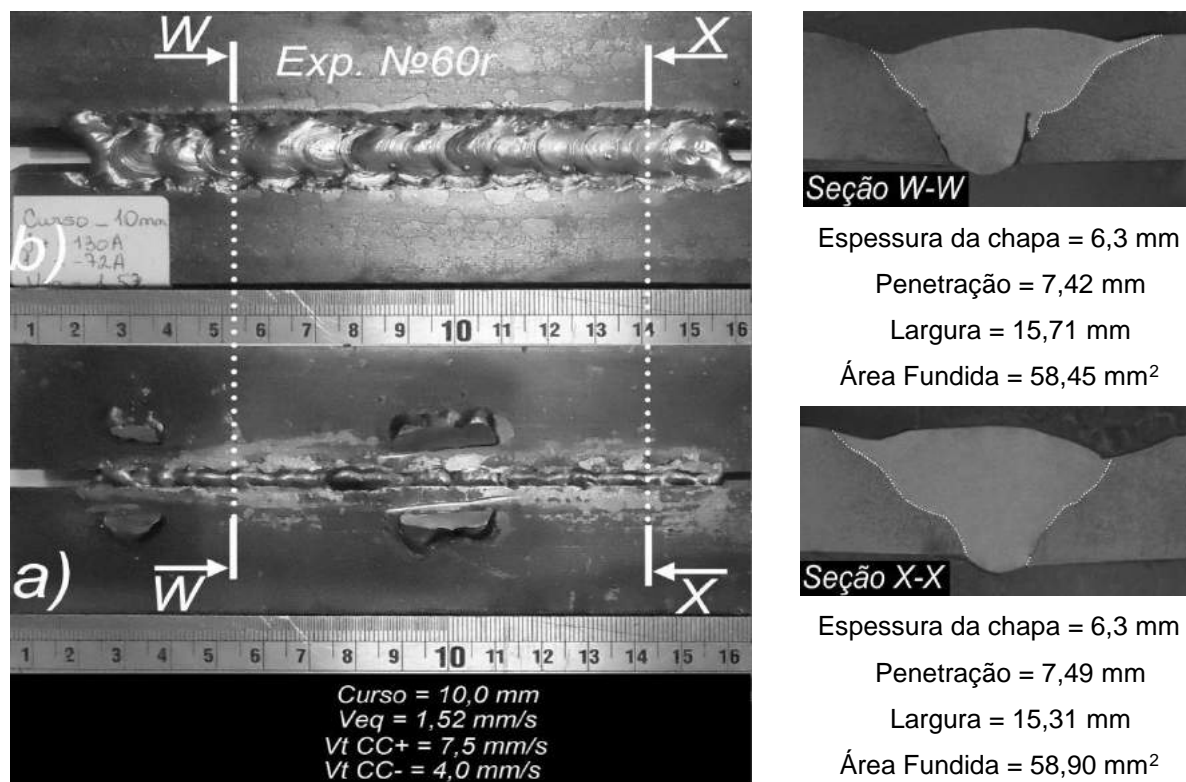


Figura A6.3 – Aspecto do cordão do Experimento 60r (réplica) com curso de 10,0 mm, V_{tCC+} de 7,5 mm/s e V_{tCC-} de 4,0 mm/s (V_{eq} de 1,52 mm/s): a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

Apêndice VII

Influência do curso do *Switch-back* sobre o acabamento do cordão de solda para uma mesma velocidade equivalente

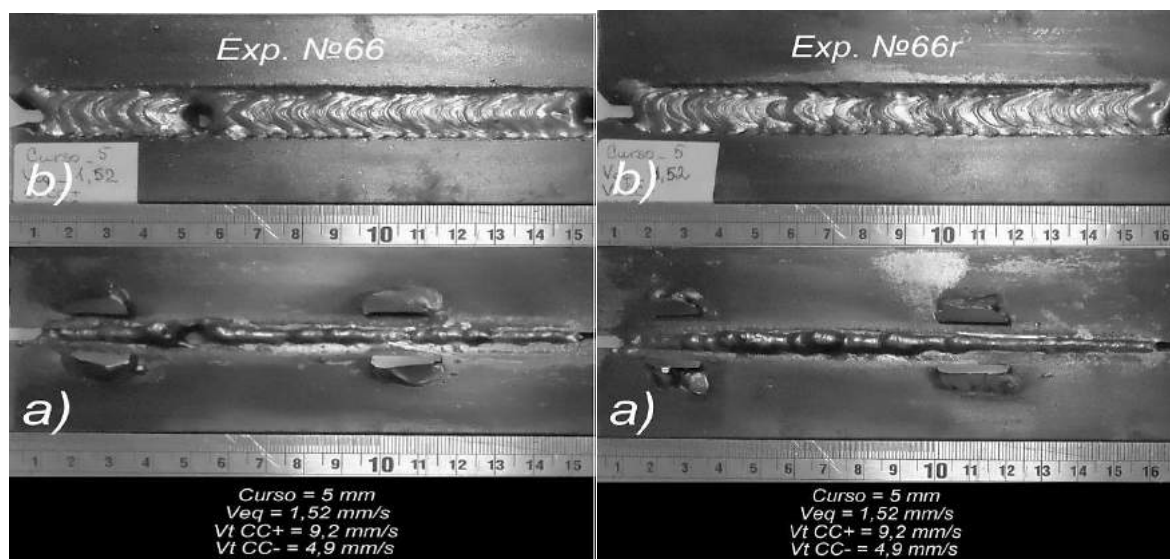


Figura A7.1 – Aspecto dos cordões dos experimentos 66 e 66r (réplica) com curso de 5 mm e V_{eq} de 1,52 mm/s (V_{tCC+} de 9,2 mm/s e V_{tCC-} de 4,9 mm/s), respectivamente: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

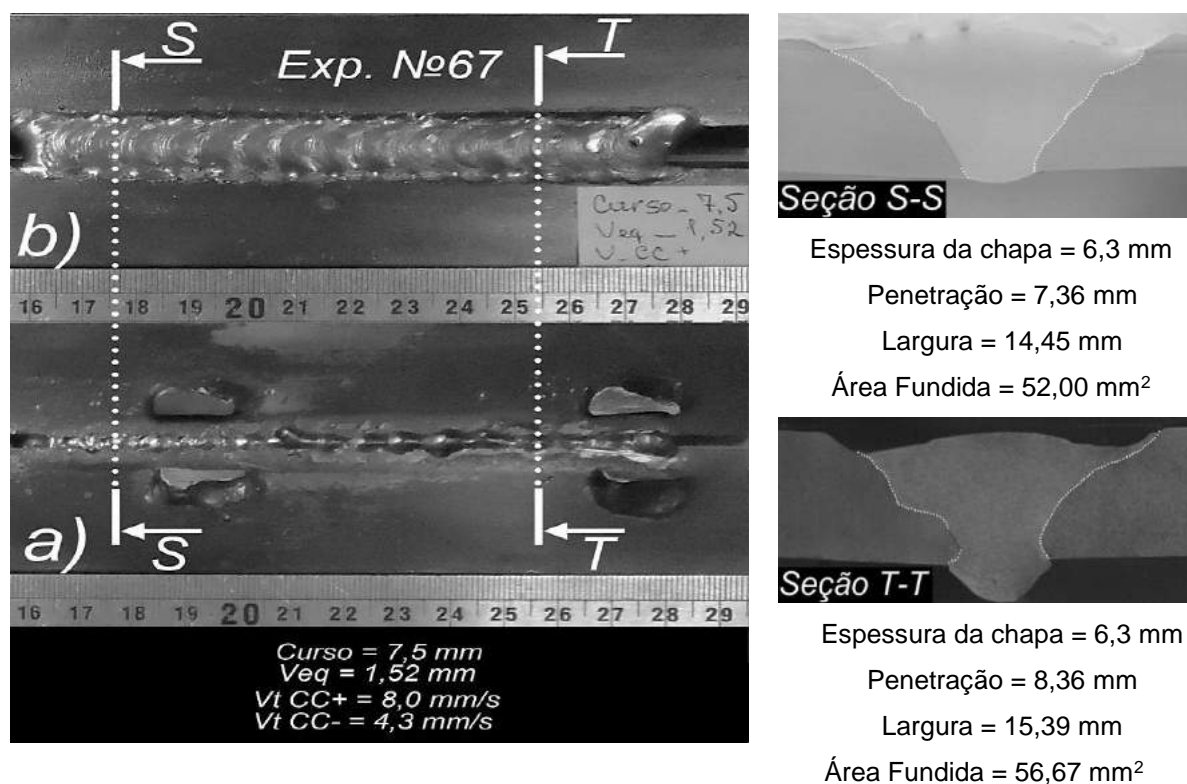


Figura A7.2 – Aspecto do cordão do Experimento 67 com curso de 7,5 mm e V_{eq} de 1,52 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (linha desenhada sobre contorno do cordão da região fundida para melhor caracterizar geometria) (soldagem da esquerda para direita)

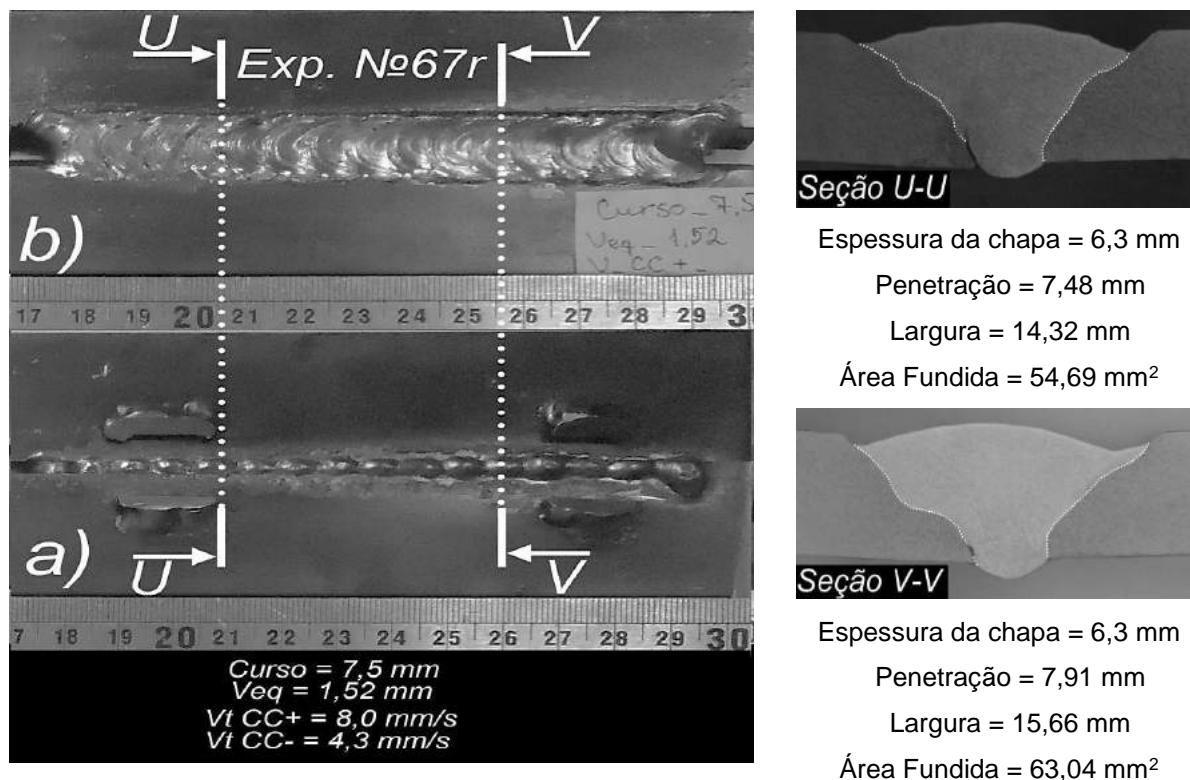


Figura A7.3 – Aspecto do cordão do Experimento 67r (réplica) com curso de 7,5 mm e Veq de 1,52 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

Apêndice VIII

Influência do aumento da velocidade equivalente mantendo a porcentagem dos tempos em cada polaridade constante no ciclo de soldagem

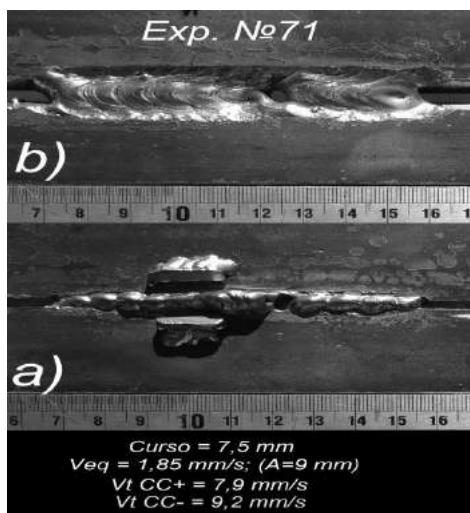


Figura A8.1 – Aspecto do cordão do Experimento 71 com curso de 7,5 mm e V_{eq} de 1,85 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

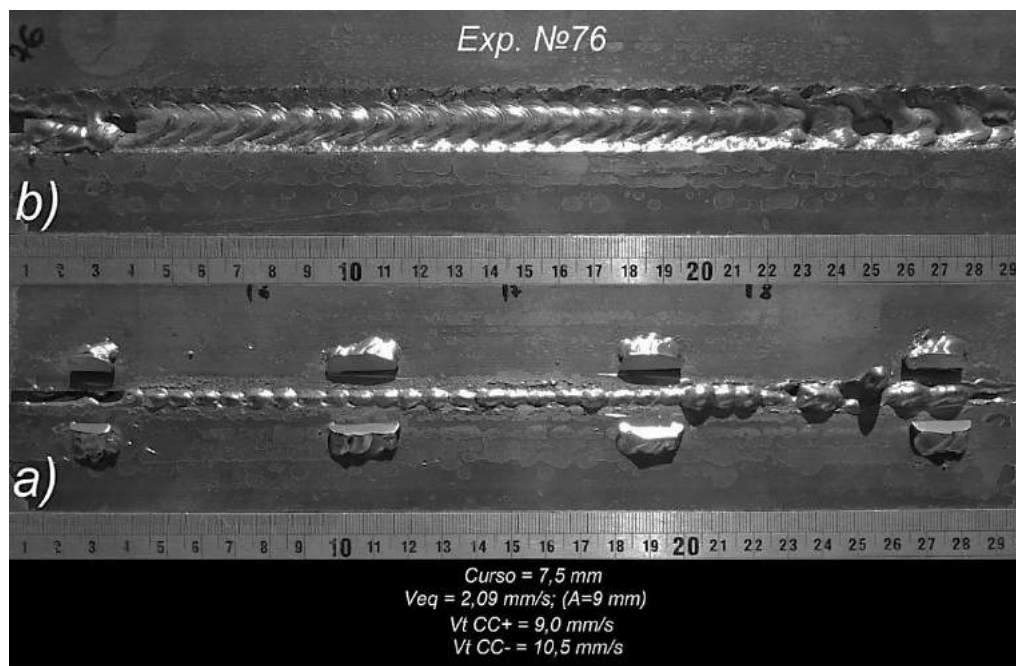


Figura A8.2 – Aspecto do cordão do Experimento 76 com curso de 7,5 mm e V_{eq} de 2,09 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da direita para esquerda)

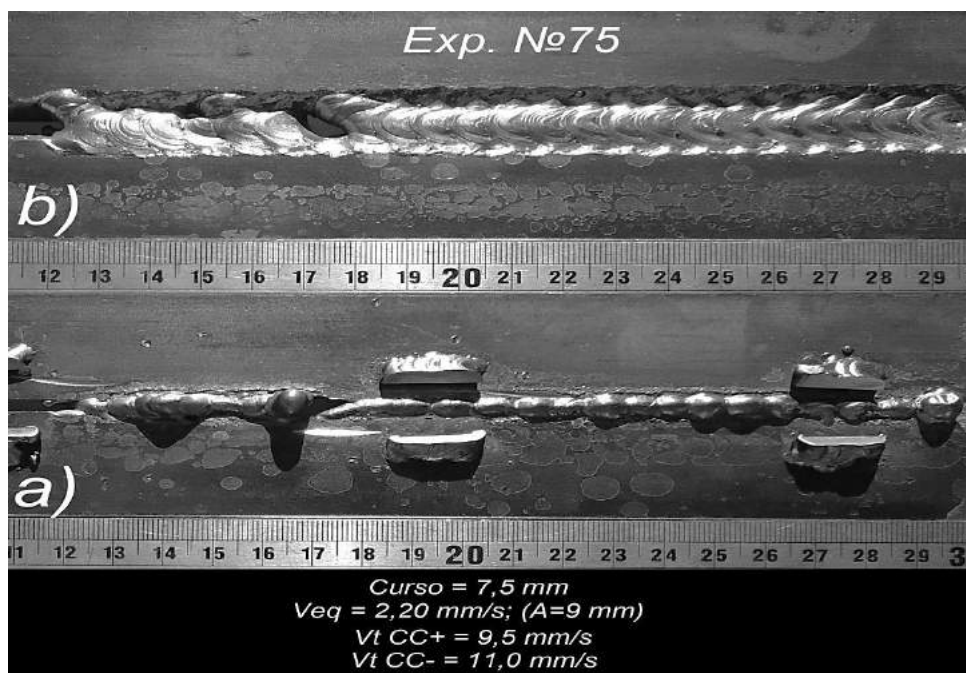


Figura A8.3 – Aspecto do cordão do Experimento 75 com curso de 7,5 mm e V_{eq} de 2,20 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

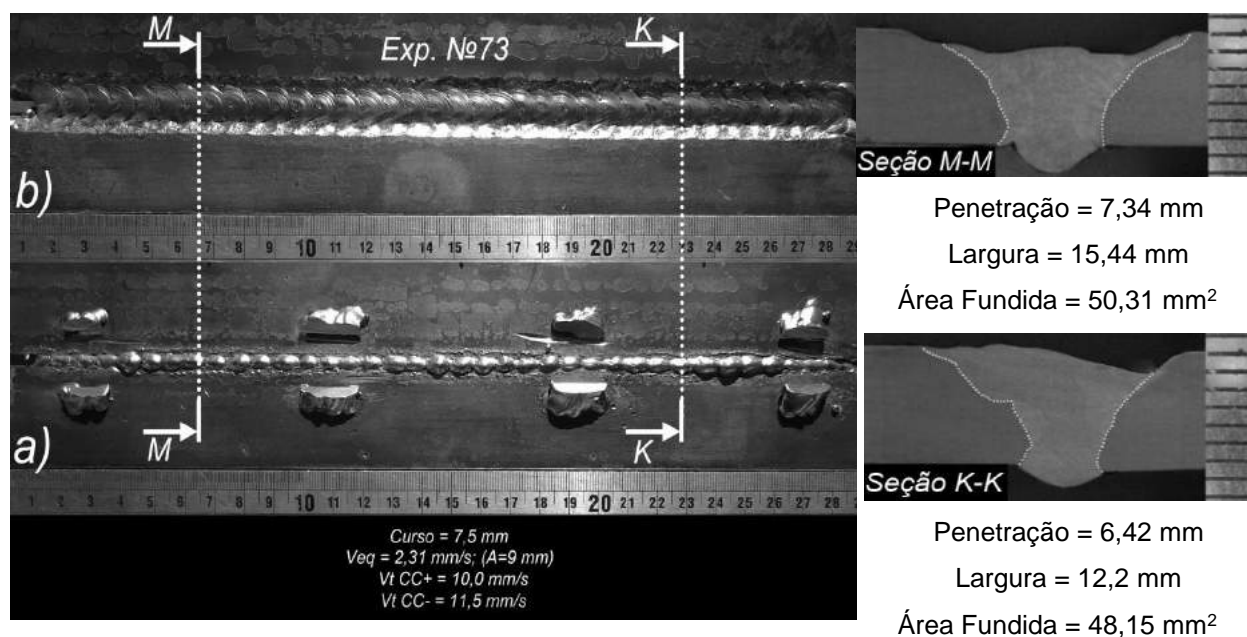


Figura A8.4 – Aspecto do cordão do Experimento 73 com curso de 7,5 mm e V_{eq} de 2,31 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da direita para esquerda)

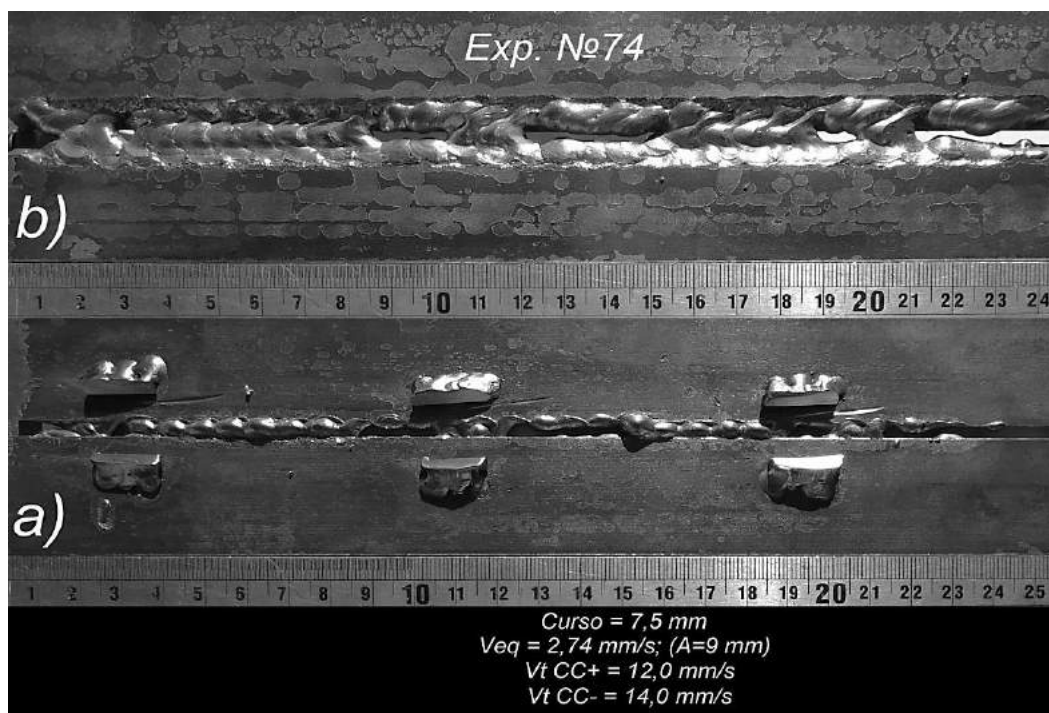


Figura A8.5 – Aspecto do cordão do Experimento 74 com curso de 7,5 mm e V_{eq} de 2,74 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)

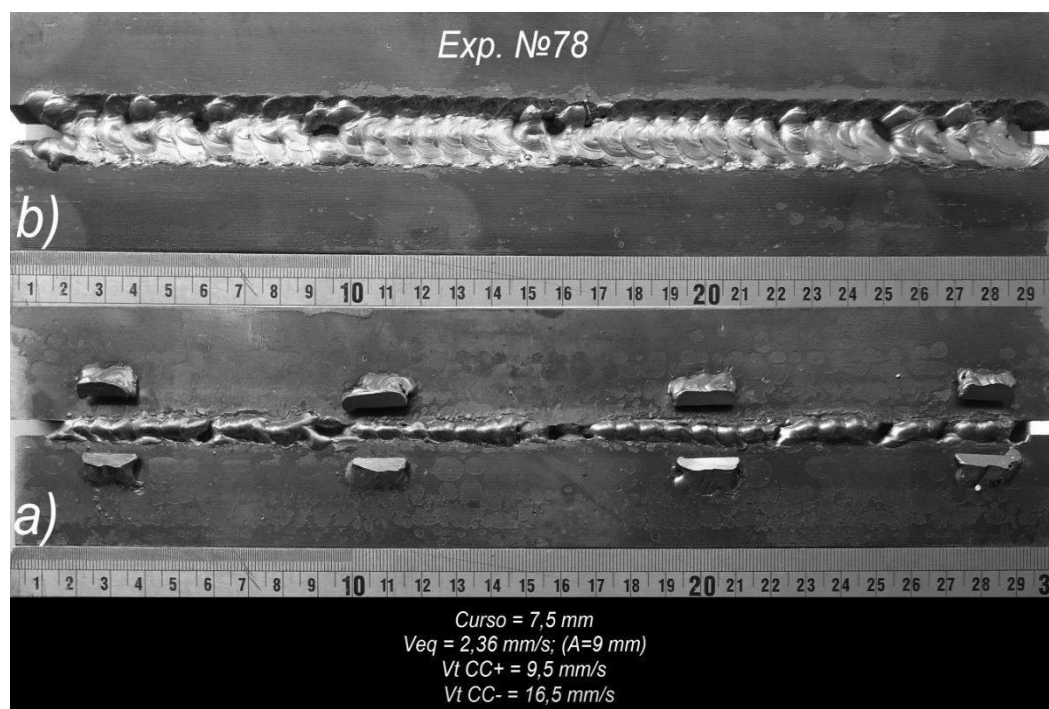


Figura A8.6 – Aspecto do cordão do Experimento 78 com curso de 7,5 mm e V_{eq} de 2,36 mm/s: a) raiz do cordão; b) face do cordão (soldagem da esquerda para direita)