

HÉLIO ANTÔNIO LAMEIRA DE ALMEIDA

AVALIAÇÃO DE POTENCIALIDADES DA SOLDAGEM
MIG/MAG AUTOMATIZADA UTILIZANDO A TÉCNICA
SWITCHBACK



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2018

HÉLIO ANTÔNIO LAMEIRA DE ALMEIDA

**AVALIAÇÃO DE POTENCIALIDADES DA SOLDAGEM
AUTOMATIZADA MIG/MAG UTILIZANDO A TÉCNICA *SWITCHBACK***

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de
Fabricação

Orientador: Prof. Américo Scotti

Co-Orientador: Prof. Carlos Alberto Mendes da Mota

UBERLÂNDIA – MG

2018

HÉLIO ANTÔNIO LAMEIRA DE ALMEIDA

**AVALIAÇÃO DE POTENCIALIDADES DA SOLDAGEM MIG/MAG
AUTOMATIZADA UTILIZANDO A TÉCNICA *SWITCHBACK***

Tese **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. Carlos Alberto M. da Mota (Dr.) – UFPA (Co-Orientador)

Prof. Louriel Oliveira Vilarinho (PhD) – UFU

Prof. Douglas Bezerra de Araujo (Dr.) – UFU

Profa. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa (Dra.) – CEFET - MG

Prof. Tiago Felipe de Abreu Santos (Dr.) – UFPE

Prof. Altino Loureiro (PhD) – Universidade de Coimbra, Portugal

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
(CIP) Sistema de Bibliotecas da UFU, MG,
Brasil.

A447a Almeida, Hélio Antônio Lameira de, 1979-
2018 Avaliação de potencialidades da soldagem automatizada Mig/Mag
utilizando a técnica Switchback [recurso eletrônico] / Hélio Antônio
Lameira de Almeida. - 2018.

Orientador: Américo Scotti.

Coorientador: Carlos Alberto Mendes da Mota.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.301>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. 2. Soldagem elétrica. I. Scotti, Américo,
1955- (Orient.). II. Mota, Carlos Alberto Mendes da, (Coorient.). III.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

Maria Salete de Freitas Pinheiro - CRB6/1262

Dedico este trabalho aos meus queridos pais
ANTÔNIO AMORIM DE ALMEIDA e LAIR LAMEIRA DE
ALMEIDA pelo carinho, amor, compreensão e imenso
incentivo para que fosse alcançada mais uma vitória em
minha carreira profissional

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, por permitir que esta obra pudesse ser realizada, o que muito contribuiu para o meu crescimento pessoal e profissional;

Ao meu orientador Américo Scotti, pela orientação e pelos valiosos conhecimentos prestados para a elaboração deste trabalho. Além, é claro, de sua paciência e amizade ao longo do desenvolvimento desta tese;

Ao meu co-orientador, Carlos Alberto Mendes da Mota, da Universidade Federal do Pará (UFPA), pela co-orientação e incentivo para a realização deste doutorado e amizade;

Aos Laboratórios de Soldagem (Laprosolda), de Usinagem, de Materiais e Tribologia e à Oficina Mecânica do Departamento de Engenharia Química (todos na UFU), pela infraestrutura física oferecida, sem a qual não seria possível a elaboração desta tese;

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFU, pela oportunidade em realizar o curso de doutorado;

À CAPES, programa Pró-Engenharia UFU-UFPA (Projeto CAPES PE050/2008), pelo apoio financeiro com a bolsa de estudos e custeio;

Em especial, aos professores André Resende e Washington Silva, ambos do laboratório de Tribologia, pelo auxílio na realização do ensaio charpy;

Também, em especial, para a técnica Ângela, do Laboratório de Materiais, pelo seu apoio prestado na área de metalografia;

Aos professores Valtair Ferraresi, Louriel Vilarinho e Vladimir Ponomarev, pela contribuição científica durante as fases de discussão da Tese;

Aos amigos José Henrique Vargas, Tércio Cabral, Fábio Silva, Ribamar Ribeiro, Lindberg, Carmen, Thompson Costa, Maksin, Anna Tokar, Iaroslav, Marcelo Lemos e Douglas

Bezerra, pela amizade, incentivo e ajuda em algumas etapas de realização deste trabalho;

Aos colegas Diandro, Edmundo e Luis do Laprosolda, Ednaldo, Lazinho e Passarinho do Laboratório de Usinagem, Edilberto do Laboratório de Física, Humberto e Ulisses da Oficina Mecânica do Departamento de Engenharia Química, todos pelo apoio e colaboração no manuseio de máquinas e equipamentos necessários durante a etapa experimental da Tese

À Lícia Cerqueira Ferreira e seus pais, João Carmino Ferreira e Joana Cerqueira Ferreira, além dos amigos Leão, Ita e Regina que durante a maior parte da tese estiveram me apoiando e incentivando para que fosse alcançada mais esta vitória em minha vida profissional;

Aos meus irmãos Alex Antônio Lameira de Almeida e Sandra Andréa Lameira de Almeida, bem como demais familiares, pelo carinho, incentivo e apoio durante as fases difíceis enfrentadas ao longo deste trabalho;

À minha esposa Mariane Ribeiro Costa e minhas filhas Alice Lohani, Ana Sophia e a recém chegada Ana Heloíse pelo incentivo e apoio para a conclusão deste Trabalho;

Finalmente, a todos aqueles que diretamente ou indiretamente puderam contribuir de alguma maneira à conclusão desta obra.

ALMEIDA, H.A.L.. **Avaliação de Potencialidades da Soldagem MIG/MAG Automatizada utilizando a Técnica Switchback**. 2018. 190 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

Resumo

A técnica “SwitchBack” consiste em oscilar a tocha durante a soldagem na direção longitudinal do cordão. Um movimento de avanço e recuo da tocha se repete periodicamente ao longo da junta. Pesquisas apontam para um potencial da técnica em permitir o aumento da velocidade limite de soldagem e em controlar a solidificação da poça. Entretanto, pouco se conhece sobre os parâmetros que controlam a robustez do processo e sobre os aspectos metalúrgicos do metal de solda depositado. Assim, este trabalho teve como principal objetivo conhecer o efeito da técnica SwitchBack sobre a estrutura de solidificação do cordão produzido em soldagem MIG/MAG automatizada, avaliando o seu potencial para promover o controle da poça de fusão. Para atingir os objetivos propostos, inicialmente fez-se um estudo qualitativo do efeito do comprimento de reversão e do ângulo de ataque da tocha sobre a estrutura de solidificação do cordão. Uma câmera termográfica foi usada para verificar a temperatura sob o cordão, procurando fazer a correlação do fluxo de calor com os resultados. Em seguida, avaliou-se a robustez do processo no controle da poça de fusão, na posição plana e fora de posição. Também foi avaliado o potencial da técnica em aumentar a velocidade limite na soldagem. O efeito da técnica sobre as transformações metalúrgicas foi estudado, do ponto de vista da microscopia óptica, e pelas propriedades mecânicas. Todo o estudo foi feito de forma comparativa com o processo MIG/MAG Pulsado convencional. Os resultados mostraram que o ângulo de ataque e o comprimento da reversão afetam a estrutura de solidificação do cordão, favorecendo a recristalização de grãos no metal de solda próximos à linha de fusão. Quanto maior o comprimento de reversão maior o refino destes grãos. Durante as soldagens na posição plana, a melhor situação da técnica é aquela em que o avanço da tocha é realizado com menor velocidade que a reversão. Nas soldagens fora de posição, o emprego da técnica propicia uma maior robustez no controle da poça de fusão. O emprego da técnica permite ainda aumentar velocidade limite de soldagem sem prejuízos para a geometria do cordão.

Palavras-chaves: Tecimento Switchback. MIG/MAG Pulsado. Recristalização. Controle da poça de fusão

ALMEIDA, H.A.L.. **Assessment of the automated MIG/MAG welding potentialities using Switchback technique**. 2018. 190 f. Thesis, Federal University of Uberlândia, MG.

Abstract

The "SwitchBack" technique is to weaving the torch during welding in the longitudinal direction of the bead. These movements repeated periodically along the joint. Research indicate a potential allow increased welding speed limit and control the solidification of the pool. However, little is known about the parameters that control the process robustness, as well as about the metallurgical aspects weld metal deposited with this technique. This study aimed to determine the effects of the Switch-Back technique on structure of weld solidification produced in MIG / MAG automated, evaluating its potential to promote control of the weld pool and change metallurgically the microstructure of the bead. To achieve the proposed objectives, initially made a qualitative study of the effect of the reversal of length and torch angle of attack on the cord solidification structure. A thermographic camera was used to check the temperature in the bead, trying to correlate the heat flux to the results. At a later stage, was evaluated the robustness of the process to control the weld pool as the penetration of the bead, both in the flat position and out of position. Also, was evaluated the potential of the technique to increase the speed limit in the welding. Finally, the effect of the technique on secondary metallurgical transformation was studied, from the point of view of optical microscope, such as the mechanical properties. All study was done on a comparative basis with the MIG / MAG conventional Pulsed process. The results showed that the attack angle and the length of the cord reversal affect the solidification structure, recrystallization grains favoring the metal near the weld fusion line. As for the length of reversal, its increase resulted in higher refining these grains. During the welding in the flat position, the better off technique was that in which the torch was carried forward at a lower speed than during the backward. In welding out of position, the technique of employment provided the most robust in the control of weld pool. The use of the technique allowed increase to increase the limit speed without bringing harm to the geometry of the bead.

Keywords: Switchback oscillation. Pulsed MIG/MAG. Recrystallization. Weld pool control

Sumário

CAPÍTULO I	10
INTRODUÇÃO	10
CAPÍTULO II	12
Revisão Bibliográfica	12
2.1 O Processo de Soldagem MIG/MAG	12
2.2 A técnica <i>Switchback</i>	16
2.3 Aspectos Metalúrgicos	24
2.3.1 Solidificação dos metais	255
2.3.2. Transformações das fases no estado sólido no resfriamento	37
2.3.2 O processo de Refusão	42
2.4 O efeito “humping” (costa de dragão)	46
CAPÍTULO III	52
Equipamentos, Insumos e Parametrização da Soldagem MIG/MAG.....	52
3.1 Bancada de soldagem	52
3.3 Gás de proteção	58
3.4 Metais de base e de adição	59
3.5 Definição dos parâmetros de corrente pulsada	59
3.6 Definição das variáveis da soldagem MIG/MAG	60
3.6.1 Velocidade de alimentação do arame.....	60
3.6.2 Velocidade de soldagem	61
CAPÍTULO IV	65
Efeito da Técnica <i>Switchback</i> sobre a Estrutura de Solidificação do Cordão	65
4.1 Metodologia adotada para avaliar o efeito da reversão sobre a estrutura de solidificação do cordão.....	65
4.2 Efeito da reversão	67
4.3 Efeito da Inclinação da tocha	70
4.4 Efeito da variação do comprimento da reversão	73
4.5 Correlação dos resultados encontrados com a temperatura sob o cordão	79
4.5.1 Influência da Temperatura na recristalização do cordão.....	80
4.5.2 – Análise da alteração da energia imposta no início da reversão	84
4.5.3 Análise de múltiplas reversões	98

CAPÍTULO V.....	106
Otimização das Variáveis da Técnica Switchback para Controlar a Poça de Fusão Visando Confeccção Robusta de Passes de Raiz	106
5.1 Metodologia adotada para avaliar o potencial da técnica quanto à robustez da penetração do cordão	106
5.2 Comportamento da penetração dos cordões produzidos sem o emprego da técnica	107
5.3 Comportamento da penetração dos cordões produzidos com o emprego da técnica	109
5.4 Efeito da mudança da velocidade da tocha	113
5.4.1 Redução da velocidade de avanço.....	113
5.4.2 Aumento da velocidade de avanço.....	117
5.4.3 Mudança da velocidade equivalente (efeito da energia de soldagem).....	118
5.4.4 Efeito da mudança do comprimento da reversão	120
CAPÍTULO VI.....	122
Avaliação da Técnica Switchback Visando Aumento da Velocidade Limite de Soldagem	122
6.1 Introdução	122
6.2 Procedimento experimental.....	122
6.3 Verificação do potencial da técnica no aumento da velocidade limite de soldagem .	123
6.3.1 Análise da equivalência de tempo	126
3.0 Efeito da sobreposição sobre a velocidade limite	130
6.4 Discussão final	139
CAPÍTULO VII.....	144
Avaliação da Potencialidade da Técnica Switchback na Posição Filete Sobrecabeça	144
7.1 Procedimento Experimental	144
7.2 Resultados	146
7.4 Comentários Finais	150
CAPÍTULO VIII.....	152
Avaliação do Efeito da Técnica Switchback sobre o Comportamento Mecânico de Juntas Soldadas	152
8.1 Introdução	152
8.2 Metodologia adotada para a avaliar o comportamento mecânico das soldas produzidas	152
8.2.1 Preparação das Placas de teste e das amostras para ensaio Charpy.....	152
8.2.2 – Verificação da adequação do equipamento para ensaio Charpy e condições do teste	157
8.3 Avaliação do comportamento mecânico das soldas produzidas.....	159
CAPÍTULO IX.....	165

Análise da Temperatura sob o Cordão de Solda Depositado com a Técnica Switchback	165
9.1 Introdução	165
9.2 Metodologia	166
9.1.1 Bancada automatizada para soldagem com a técnica switchback	166
9.1.2 Calibração do Arranjo dos Carros de Deslocamento	171
9.3 Resultados e Discussões	175
9.3.1 Estrutura de solidificação do cordão produzido	175
9.3.2 Análise da Temperatura sob o cordão	177
9.4 CONCLUSÃO	180
CAPÍTULO X.....	182
Conclusões	182
CAPÍTULO XI	184
Sugestões para trabalhos futuros	184
CAPÍTULO XII	185
Referências Bibliográficas	185

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A característica mais marcante do processo de soldagem MIG/MAG é a sua produtividade relativamente alta (alta capacidade de produção e baixo custo). O aumento da produtividade de um processo de soldagem é normalmente mensurado pela velocidade de deslocamento da tocha de soldagem que é conseguida para preencher um dado volume de solda (menor tempo de operação, menos gasto com mão de obra e insumos como gases, além da redução do prazo de entrega). Entretanto, existe um limite máximo para esta velocidade e este limite não está vinculado apenas à máxima capacidade de produção do processo (que depende da corrente máxima alcançável e do diâmetro de arame utilizável). Normalmente, o cordão de solda perde qualidade superficial e geométrica acima desse valor limite de soldagem, devido ao surgimento de descontinuidades, como mordeduras e “humping”, (Nguyen, 2005). Assim, passa esse valor a ser o valor limite da velocidade de soldagem para uma dada condição (limitante da produtividade). Trabalhos, como o de Bruecker (2007), apontam que é possível aumentar ainda esse limite de velocidade de soldagem, sem comprometer a integridade da solda. Isto pode ser conseguido a partir do uso de uma técnica conhecida como *Switchback* para movimentação da tocha no processo de Soldagem MIG/MAG. A técnica “Switchback” consiste em oscilar a tocha durante a soldagem na direção longitudinal do cordão. Inicialmente a tocha avança um certo comprimento e, em seguida, recua (reversão), com um comprimento menor do que o do avanço. Este movimento da tocha se repete periodicamente ao longo da junta.

À técnica Switchback também é creditada a possibilidade de controle da poça de fusão durante a soldagem, que também favorece o aumento da produtividade da soldagem MIG/MAG. Trabalhos, como os de Kaneko et al, (2007) e Yamane et al. (2007, 2009), mostram que esta técnica contribui para estabilizar a raiz da solda na soldagem MIG/MAG

de juntas de topo sem a utilização de cobrejunta. Isto é muito importante, pois a fabricação e montagem do cobrejunta e a sua remoção após a soldagem leva tempo e aumenta os custos do projeto de fabricação de uma estrutura metálica. Além disso, sabe-se que o controle da penetração ao longo da junta é indispensável para garantir a resistência a solicitações mecânicas requerida pelo projeto, refletindo na segurança necessária que o produto deve passar ao usuário (funcionalidade do produto).

Entretanto, pouco ainda se sabe sobre esta técnica, principalmente no que se refere ao aspecto metalúrgico da região soldada. Com o movimento repetitivo, pode acontecer um processo de refusão do cordão em fase de solidificação ou já solidificado. É conhecido da literatura (KOU, 2003) que na soldagem multipasses o passe posterior tende a promover um tratamento térmico no passe anterior, acarretando melhorias na microestrutura em função de transformações no estado sólido. Na técnica *Switchback* isto pode acontecer, já que a soldagem não é contínua, ou seja, a todo momento uma região soldada é reaquecida. Além disto, com a oscilação da tocha (longitudinalmente ao cordão) durante a soldagem, a poça de fusão sofre uma agitação que pode ou não favorecer a microestrutura do metal de solda. Um dos benefícios da perturbação do regime térmico da poça de fusão (devido a oscilação da tocha) seria o refino da estrutura de solidificação do metal de solda (KUO, 2008). Uma das maneiras de justificar este refino é pela fragmentação dendrítica, que pode ocorrer devido o processo de refusão (RETTENMAYR, 2009). Neste caso, a poça líquida pode refundir as pontas dos braços dendríticos em formação, os quais são levados para frente da interface sólido/líquido. Se as pontas das dendritas “sobreviverem” ao meio líquido, elas irão formar sítios para a nucleação heterogênea de novos grãos no metal de solda. Naturalmente, o regime de formação da poça vai alterar também a formação geométrica do cordão, consequentemente afetando também a velocidade limite do processo.

Por ainda não ter respostas sobre o efeito da aplicação da técnica *switchback* na soldagem MIG/MAG, muito ainda deve ser investigado para avaliar as melhorias que esta técnica pode trazer para o controle da poça de fusão e para a microestrutura da solda. Por isso, este trabalho tem como objetivo fazer uma investigação sobre o efeito dos parâmetros da técnica *Switchback* sobre a estrutura de solidificação do cordão obtido na soldagem MIG/MAG, verificando se realmente esta técnica pode promover alterações metalúrgicas de recristalização de parte do cordão de forma a melhorar a tenacidade e exercer o controle da poça de fusão (efeitos sobre a robustez do cordão quanto à penetração e a estabilidade fora de posição e, ainda, quanto ao aumento da velocidade limite de soldagem).

CAPÍTULO II

Revisão Bibliográfica

2.1 O Processo de Soldagem MIG/MAG

A soldagem MIG/MAG é um processo de união que se baseia numa fonte de calor de um arco elétrico estabelecido entre a extremidade de um arame-eletrodo nu, consumível e alimentado continuamente, e a peça a ser soldada. A proteção da região da solda (poça de fusão, regiões adjacentes e gotas em transferência) é realizada por uma atmosfera gasosa externa que pode ser do tipo inerte (Argônio ou Hélio) ou do tipo ativo (geralmente dióxido de carbono) ou ainda por uma mistura de ambos. O fundamento deste processo pode ser visualizado por intermédio da Figura 2.1.

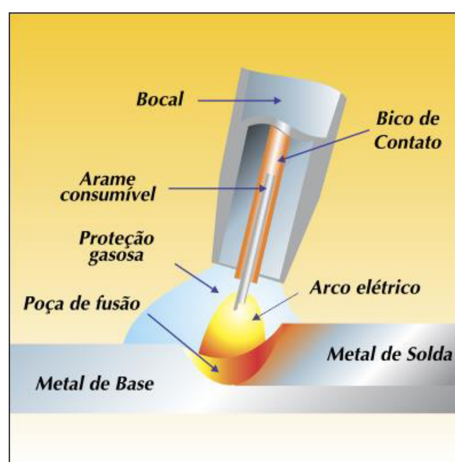


Figura 2.1 – Ilustração do Processo de Soldagem MIG/MAG (<http://www.eutectic.com.br/equipamentos-soldagem-mig-mag.html>, 2018)

O acrônimo MIG/MAG vem do inglês, onde MIG significa *Metal Inert Gas* (Metal protegido por atmosfera gasosa inerte) e MAG significa *Metal Active Gas* (Metal protegido por uma atmosfera gasosa do tipo ativo). A soldagem MIG/MAG também pode ser conhecida como GMAW, acrônimo para *Gas Metal Arc Welding* (Soldagem a Arco com Metal protegido por um Gás). O processo MIG/MAG pode ser aplicado de forma automática, quando o movimento da tocha é realizado mecanicamente, ou de forma semiautomática, quando a tocha é conduzida manualmente pelo soldador. Neste processo, o arame é alimentado continuamente de forma mecânica por intermédio de um cabeçote alimentador do arame interligado com a fonte de energia. O arame percorre internamente todo o comprimento da tocha de soldagem até a sua extremidade onde encontra-se o bico de contato, o qual está conectado a um dos dois polos da fonte (geralmente o positivo). À peça é conectado o cabo terra, interligando com o outro polo da fonte (geralmente o negativo). Assim, o arame é energizado quando toca a peça e o arco elétrico é aberto e mantido. Uma atmosfera gasosa na região de soldagem garante uma estabilidade maior do arco, além de proteger o material fundido (poça e ponta do arame) contra gases nocivos da atmosfera.

O MIG/MAG é um processo considerado de alta capacidade de produção quando comparado com outros processos a arco elétrico, como o Eletrodo Revestido e o TIG (Tungsten Inert Gas). Isto porque a alimentação do arame-eletrodo é realizada de forma contínua e não produz muita escória. Mas a principal razão para a alta capacidade de produção (taxa de deposição) é a característica de alta densidade de corrente passando pelo arame-eletrodo, possível devido ao pequeno comprimento livre do mesmo entre o bico de contato e a peça. Soma-se a isso a facilidade de automação e robotização do processo, devido a flexibilidade e baixo peso da tocha.

A soldagem MIG/MAG é aplicada para soldar metais ferrosos (aço carbono, aço baixa liga, aço alta liga, etc.) e não-ferrosos (ligas de alumínio, cobre, níquel, principalmente). Dependendo de sua aplicação, o tipo de atmosfera de proteção gasosa pode variar. Por exemplo, na soldagem de aço carbono pode-se trabalhar com atmosfera gasosa totalmente ativa, dando a denominação MAG ao processo (Metal Active Gas). Já na soldagem do alumínio, utiliza-se atmosfera do tipo inerte, recebendo a denominação MIG (Metal Inert Gas).

Nesta soldagem, o arame-eletrodo funde com o calor do arco elétrico e é transferido para a poça de fusão de três formas básicas, a saber, curto-circuito, globular e goticular (Figura 2.2). Na transferência metálica por curto-circuito (Figura 2.2 (A)), o metal líquido se desprende da ponta do arame eletrodo toda vez que toca a poça de fusão (curto-circuito) em função de um pequeno comprimento do arco estabelecido. Isto ocorre para baixos níveis de energia de soldagem, ou seja, baixos níveis de tensão e corrente. Por isso, este modo de

transferência é desejável na soldagem de chapas finas e também na soldagem fora da posição plana.

Ainda para baixos níveis de energia de soldagem pode ocorrer a transferência metálica do tipo globular (Figura 2.2(b)). Nesta situação, o metal líquido na ponta do arame-eletrodo cresce sem se destacar, pois o comprimento do arco é longo, diferente do caso anterior, e atinge um tamanho com diâmetro superior ao do arame-eletrodo. Devido ao seu próprio peso, a gota se destaca do eletrodo e cai para a poça de fusão. Em função das baixas energias empregadas, também é adequada para a soldagem de chapas finas, entretanto, pode surgir respingos devido ao choque da gota com a poça. Vaporização metálica também pode ser gerada em função do longo período de tempo em que a gota permanece crescendo dentro da coluna do arco elétrico. Finalmente, a transferência goticular (Figura 2.2(c)), mais conhecida no campo pela terminologia inglesa “spray”, que ocorre para altos níveis de energia empregados durante a soldagem, ou seja, altos níveis de tensão e corrente. O metal líquido em formação na ponta do eletrodo é rapidamente transferido para a poça na forma de gotículas, cujo diâmetro é inferior ou igual ao diâmetro do eletrodo, com uma frequência de destacamento muito superior ao da transferência globular. Esta facilidade na rápida transferência do metal líquido é devido a maior intensidade da força eletromagnética obtida para maiores níveis de corrente utilizados (SCOTTI e PANOMAREV, 2008).

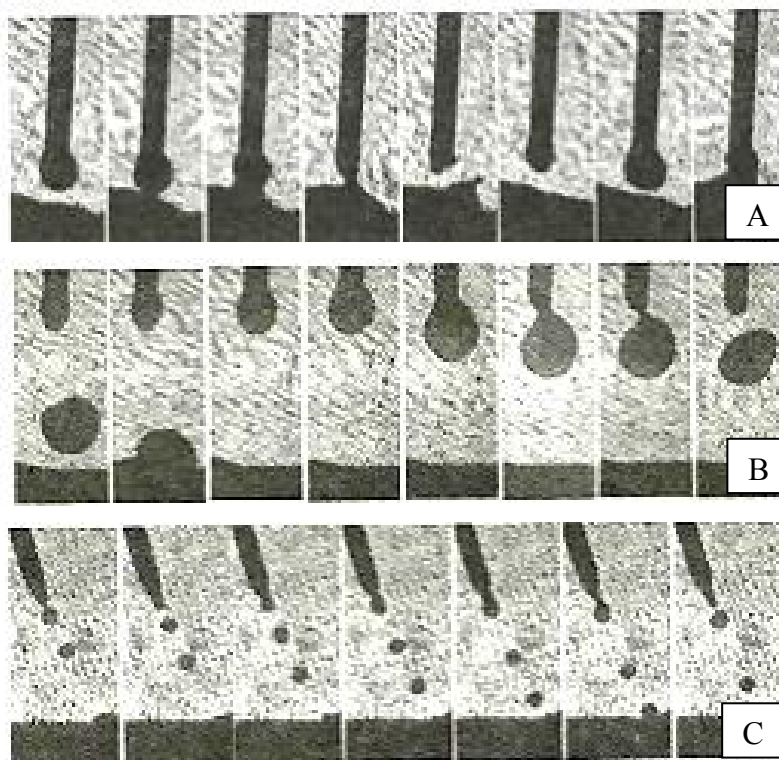


Figura 2.2 – Modos de transferência metálica: (a) curto-circuito; (b) globular e (c) goticular (SCOTTI e PANOMAREV, 2008)

O modo de transferência goticular é muito desejável, pois praticamente não tem respingos, conferindo melhor estética ao cordão e minimizando problemas de falta de fusão e falta de penetração. Entretanto, devido às altas taxas de energia empregados, a poça de fusão apresenta grande volume de material e isto dificulta a soldagem fora da posição plana, como na soldagem sobrecabeça, sendo também limitada na soldagem de chapas finas. Mas a transferência goticular pode ser induzida mesmo a baixos níveis de potência, a partir do controle da forma de onda da corrente (Figura 2.3). Para tal é necessário conhecer os parâmetros operacionais, corrente de pico (I_p), corrente de base (I_b), tempo de pico (t_p) e tempo de base (t_b), os quais variam dependendo do tipo de material a ser soldado. Durante o período de atuação da corrente de pico, uma única gota deverá ser destacada da ponta do arame-eletrodo. No período de corrente de base, por sua vez, não há destacamento de metal fundido do arame, apenas servindo para manter o arco elétrico. Esta vertente da transferência goticular é conhecida como transferência a arco pulsado. Nesta condição, a transferência das gotas metálicas é realizada com uma corrente média menor e, assim, tem-se um controle da poça de fusão que permite a aplicação da transferência goticular em chapas finas e ainda na soldagem fora da posição plana. Quando a soldagem MIG/MAG é realizada com a transferência goticular de forma controlada (arco pulsado) ela passa a ser conhecida como MIG/MAG Pulsado (PALANI, 2006 e ANDRADE, 2012).

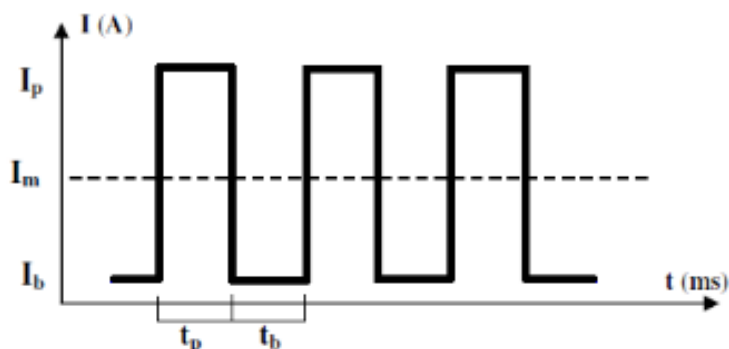


Figura 2.3 – Representação esquemática do controle da forma de onda, no caso com pulsação de corrente: I_m – corrente média; I_p – corrente de pico; I_b – corrente de base; t_p – tempo de pico; e t_b – tempo de base (ANDRADE, 2012)

Durante a soldagem em corrente pulsada, uma única gota metálica deve ser transferida no período em que a corrente permanece no pico. Somente assim, poderá ser garantida a estabilidade do processo MIG/MAG durante a transferência de metal para a poça de fusão. A forma de onda da corrente pulsada afeta a transferência metálica (WU et al., 2005; PALANI et al., 2006). Dependendo do seu formato, que depende dos valores dos

parâmetros da corrente pulsada, pode ocorrer a transferência de mais de uma gota por pulso, gerando instabilidades na soldagem. A possibilidade do controle da forma de onda da corrente foi possível com a evolução das fontes de soldagem. Atualmente, as fontes modernas são fabricadas com componentes eletrônicos que permitem o controle da corrente média, na soldagem a arco pulsado, buscando controlar a transferência de metal com uma menor energia inserida na peça. Entretanto, uma das dificuldades de se trabalhar com a corrente pulsada é definir os parâmetros operacionais (correntes de pico e de base, tempos de pico e de base). Mas, este problema foi minimizado com o advento do controle sinérgico. As fontes atuais que têm este controle definem automaticamente as variáveis de corrente pulsada, a partir de dados de entrada, como a velocidade de alimentação do arame, o tipo de gás de proteção, o tipo de diâmetro do arame-eletrodo, o tipo de material a soldar, etc.. (PRAVEEN et al., 2005; JOSEPH et al., 2005).

2.2 A técnica *Switchback*

Na Técnica *Switchback*, a tocha de soldagem do processo MIG/MAG é deslocada para frente em um determinado comprimento (denominado daqui em diante de avanço da tocha) e, em seguida, deslocada para trás em um comprimento de cerca da metade do anterior (denominado daqui em diante de reversão ou recuo da tocha), como apresentado na Figura 2.4. Estes dois movimentos se repetem continuamente durante a soldagem. As velocidades dos movimentos para frente (avanço) e para trás (reversão) podem ser iguais ou diferentes.

Pesquisas desenvolvidas com esta técnica no LAPROSOLDA (BRUECKER, 2007) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) permitiram mostrar que ela pode promover o aumento da velocidade de soldagem do processo MIG/MAG sem a ocorrência de má formação do cordão. Foi verificado que a técnica *Switchback* aplicada ao processo MIG/MAG Pulsado no modo automático (tocha adaptada em robô) permitiu um aumento da velocidade de soldagem em até 60% na soldagem de juntas sobrepostas com chapas de aço de 3 mm de espessura, aumentando ainda mais a produtividade do processo. Sem a utilização da técnica, a velocidade de soldagem máxima alcançada para a realização dos cordões com aparência e penetração adequados foi de 35 cm/min, enquanto com a técnica a velocidade de soldagem máxima alcançada foi de 57 cm/min, como pode ser observado na Tabela 2.1.

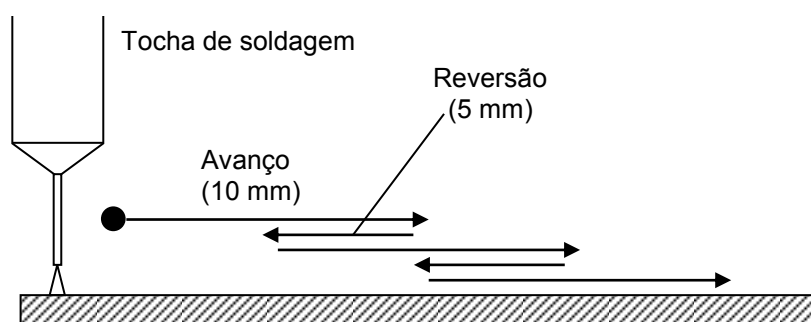


Figura 2.4 – Ilustração da técnica *Switchback* unto a soldagem MIG/MAG (BRUECKER, 2007)

Tabela 2.1 - Máxima velocidade de soldagem na obtenção de soldas com boa aparência superficial e geométrica (fonte: BRUECKER, 2007)

Condição de Soldagem	Max. Veloc. Soldagem [cm/min]	Corrente [A]	Tensão [V]	Aparência do cordão
MIG/MAG Pulsado	35	150.5	21.4	
MIG/MAG Pulsado Switchback	57	150.9	22.0	

Visando se conseguir depósitos com maior capacidade de produção e com cordões de baixa convexidade para revestimentos soldados, Kovalenko et al. (2013) reportam uma série de soldagens automatizadas de simples deposição sobre chapas com diferentes técnicas e parâmetros, incluindo o MIG/MAG Switchback Pulsado com deslocamento transversal e o MIG/MAG Switchback com Duplo Pulso e Polaridade Variável. Os resultados mostraram que o tecimento por si só já é satisfatório para melhorar a convexidade do cordão, mas não é suficiente para controlar sozinho o perfil de penetração. A utilização de técnicas especiais do MIG/MAG, como Switchback, Polaridade Variável e Duplo Pulso, em função da possibilidade da distribuição controlada de energia ao longo da junta, permitiu atuar sobre o perfil da penetração do cordão e reduzindo ainda a mais a convexidade.

Outros trabalhos (KANEKO et al., 2007; YAMANE et al., 2007; YAMANE et al., 2009) mostram o potencial desta técnica no controle da raiz da solda, durante a soldagem

MIG/MAG em corrente pulsada de juntas de topo, sem a utilização de cobre-junta. Kaneko et al. (2007) realizaram soldagens com o processo MIG/MAG pulsado utilizando a técnica *Switchback* na união de chapas de aço de 3,2 mm de espessura e em topo. Eles verificaram que o uso desta técnica permitiu o controle da raiz da solda em relação a soldagem MIG/MAG convencional. Este controle cresceu quando se utilizou um maior nível de velocidade de soldagem durante o movimento de avanço da tocha em relação ao movimento de reversão (vide Figuras 2.5 e 2.6).

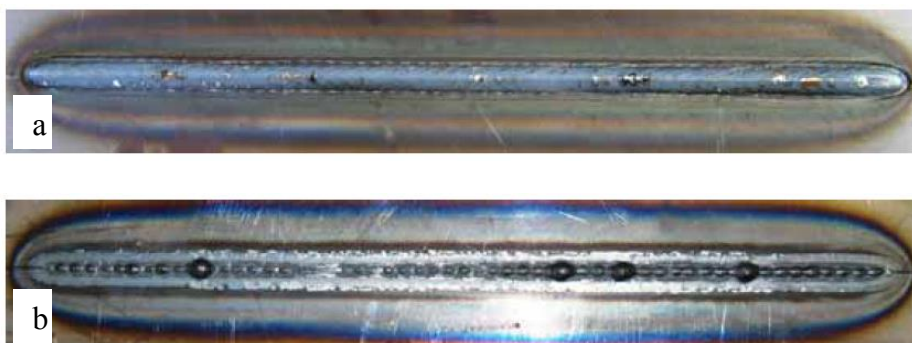


Figura 2.5 – Cordão de solda produzido com a técnica *Switchback* na soldagem MIG/MAG, com velocidade de soldagem da tocha de 75 cm/min e amplitudes de avanço de 12 mm e de reversão de 6 mm: (a) Aspecto da superfície; (b) Aspecto da raiz (KANEKO et al., 2007)

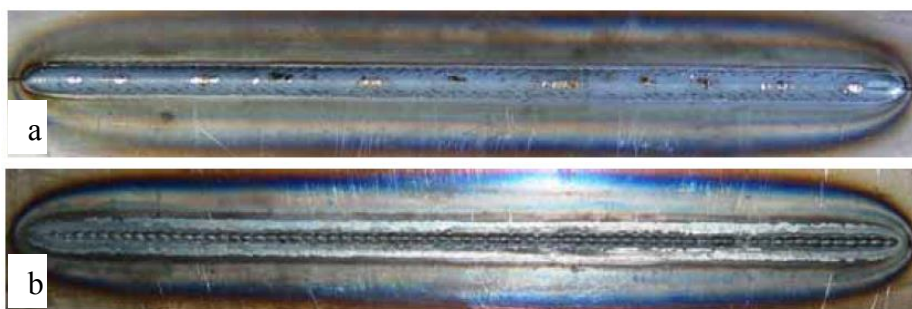


Figura 2.6 – Cordão de solda produzido com a técnica *Switchback* na soldagem MIG/MAG, com velocidade de soldagem da tocha de 164 cm/min e amplitudes de avanço de 12 mm e de reversão de 7 mm: (a) Aspecto da superfície; (b) Aspecto da raiz (KANEKO et al., 2007)

Para entender como esta técnica favoreceu o controle da raiz do cordão com o aumento da velocidade de soldagem da tocha, Kaneko et al. (2007) procuraram analisar o comportamento da poça de fusão durante a soldagem. Isto foi possível através da simulação do campo de temperatura, como indicado na Figura 2.7. As investigações realizadas

mostraram que o tamanho da poça de fusão na raiz da junta é menor quando se utiliza a técnica. Este tamanho reduz ainda mais com o uso de maior velocidade de soldagem durante o avanço da tocha, devido, principalmente, à redução do comprimento (L), justificando, então, os resultados encontrados. Com a utilização da técnica, a distância (D) entre a fonte de calor (arco elétrico) e a poça de fusão é maior do que quando não se utiliza a técnica. Assim, a poça tem condições favoráveis para esfriar mais rapidamente e não cresce bastante. Este efeito foi pronunciado quando se utilizou velocidade de soldagem no avanço maior do que na reversão.

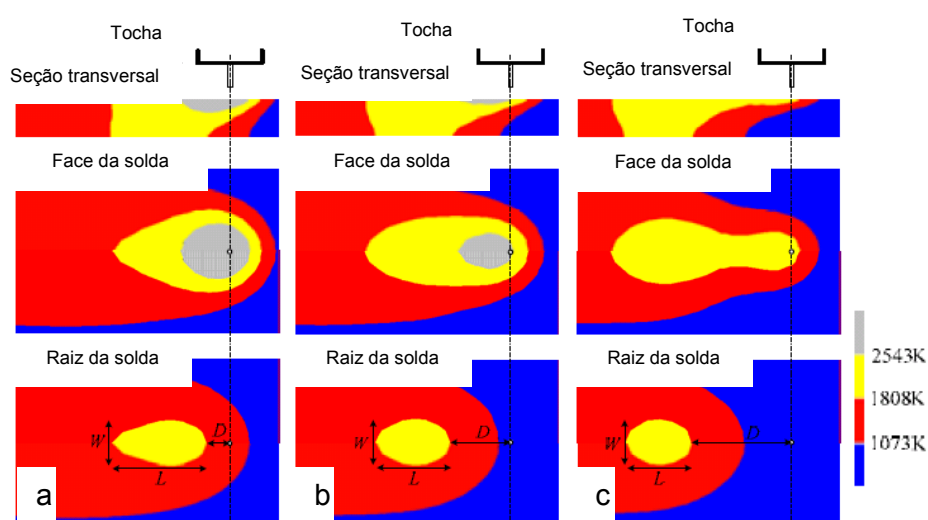


Figura 2.7 – Imagens obtidas da simulação da distribuição de temperatura numa solda: (a) Soldagem MIG/MAG; (b) Soldagem MIG/MAG com a técnica *Switchback* e velocidade de soldagem de 75 cm/min; (c) Soldagem MIG/MAG com a técnica *Switchback* e velocidades de soldagem de 164 cm/min no avanço e 55 cm/min na reversão (KANEKO et al., 2007)

Yamane e Yoshida et al. (2009) utilizaram a combinação da técnica *Switchback* com o tecimento transversal para buscar controlar a poça de fusão, na soldagem do passe de raiz em juntas de topo de aço ao carbono (com 12 mm de espessura) e sem cobre-junta. A folga foi variada de 3,8 mm a 4,3 mm, aumentando-se o grau de dificuldade para avaliar o desempenho da técnica. Foi utilizado o processo MIG/MAG Pulsado com uma mistura gasosa 98%Ar + 2%O₂ e chanfro em V (45°), como indicado na Figura 2.8. Inicialmente, a tocha avançou 9 mm a uma alta velocidade de 68 cm/min (rápida velocidade da tocha) e fazendo a reversão com o mesmo comprimento e velocidade. Depois, a tocha avançou novamente uma distância de 9 mm, porém com uma baixa velocidade de soldagem (lenta

velocidade da tocha), cerca de 11 cm/min. Nestas fases de avanço e reversão em alta e baixa velocidade, a tocha realizou um movimento senoidal (devido ao tecimento transversal, vide Figura 2.10). Assim, foi estabelecido um sincronismo entre este movimento de deslocamento da tocha com a corrente pulsada. Quando a tocha aproximava das bordas da raiz da junta a corrente pulsada atingia o seu valor de pico transferindo a gota metálica e quando aproximava do centro da junta a corrente atingia o seu valor de base, não ocorrendo transferência de metal, controlando assim a raiz da solda (sincronismo da corrente pulsada com o deslocamento da tocha).

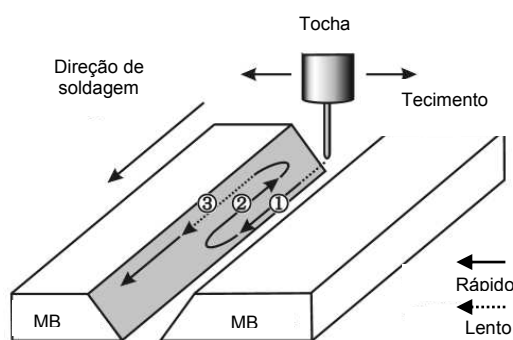


Figura 2.8 – Soldagem de chapas com chanfro em V de 45° sem cobre-junta utilizando o processo MIG/MAG Pulsado com a técnica *Switchback* (YAMANE et al., 2009)

Deve ser ressaltado que tanto a corrente média quanto a velocidade de alimentação do arame eram ajustados em tempo real para se adequar às diferentes condições de velocidade de soldagem utilizadas na técnica e variação da folga. De acordo com estes pesquisadores, o uso de uma alta velocidade de soldagem nos movimentos de avanço e reversão e sincronizados com a corrente pulsada (Figuras 2.9 e 2.10) permitiu depositar metal fundido nas bordas das juntas sem ocorrer vazamento ou destruição da raiz (Figura 2.11). Já o uso da baixa velocidade de soldagem no seguinte movimento de avanço da tocha permitiu refundir o material depositado anteriormente nas bordas da junta unindo-os. Desta maneira, foi possível a confecção de soldas com boa aparência e, principalmente, sem a perfuração da raiz da junta (Figura 2.12).

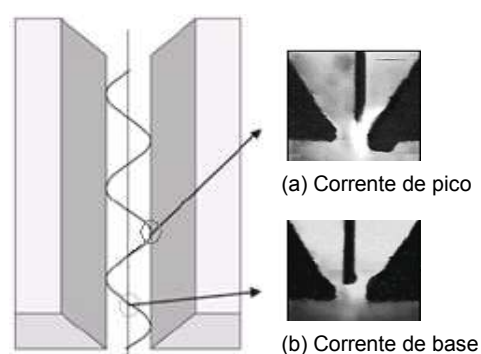


Figura 2.9 – Vista de cima da junta mostrando a trajetória da tocha (senoidal) e o seu sincronismo com a corrente pulsada (YAMANE et al, 2009)

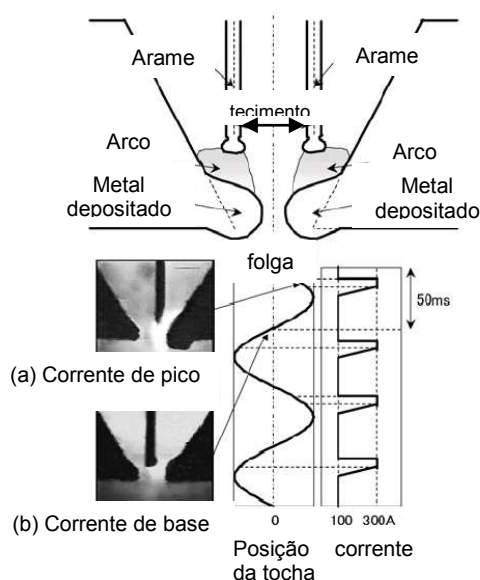


Figura 2.10 – Vista da secção transversal da junta, mostrando a relação entre o tecimento (senoidal) e seu sincronismo com a corrente pulsada (YAMANE et al, 2009)

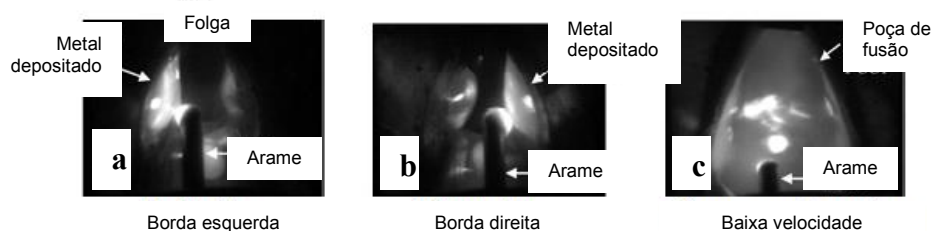


Figura 2.11 – Imagem do depósito de metal fundido nas bordas da raiz em alta velocidade durante os movimentos de avanço e reversão, (a) e (b), respectivamente, e, em (c), da poça de fusão produzida sobre o metal depositado nas bordas da raiz em baixa velocidade durante o próximo avanço da tocha (YAMANE et al., 2009)



Figura 2.12 – Aspecto da raiz da solda resultante (YAMANE et al., 2009)

Em outro trabalho de Yamane, agora com Ishikawa et al. (2007), foi proposto um sistema de controle automático da corrente, alimentação do arame, velocidade de soldagem, percursos de avanço-reversão e tecimento. Foram mantidas algumas condições do trabalho anterior, ou seja, as soldagens foram realizadas novamente com o processo MIG/MAG Pulsado em juntas de topo com 12 mm de espessura e chanfro em V (45°). Foi utilizado uma mistura gasosa 98%Ar + 2%O₂. Neste caso, a folga foi variada de 2 mm a 4,5 mm. A corrente e demais variáveis alteravam-se de valor quando se variava a folga da junta durante a soldagem. Ao mesmo tempo, a tocha realizava um tecimento senoidal com amplitude zero no centro da junta. Neste trabalho, a frequência de tecimento senoidal foi variada para 2,5 Hz, 5 Hz e 10 Hz. Houve, novamente, o sincronismo da frequência da corrente de pico com a frequência de tecimento do robô, ou seja, a corrente pulsada passava para o pico quando o tecimento aproximava-se das bordas da junta e passava para a corrente de base quando o tecimento percorria o centro da junta (corrente média de 123 A à 137 A). Desta maneira, eles conseguiram controlar a raiz da solda com a variação da folga, na soldagem com a técnica switchback.

Assim como no trabalho anterior, a tocha avançou 9 mm em alta velocidade (67,5 cm/min), recuando, logo em seguida os 9 mm com a mesma velocidade. Depois a tocha avançou 9 mm com uma baixa velocidade (10,8 cm/min). Estes movimentos se repetiram ao longo da junta durante a soldagem, juntamente com o tecimento da tocha. Os autores explicam que a perfuração da junta é evitada devido o deslocamento da tocha ocorrer em alta velocidade, não dando tempo para a poça crescer demasiadamente. A fonte de calor (arco elétrico) se afasta rapidamente, então a temperatura da poça reduz e a perfuração é prevenida. Eles também apontam ainda que durante o movimento da tocha em alta velocidade, o arco pré-aquece as bordas da raiz. Então, a molhabilidade da raiz da solda é melhorada e a formação da raiz da solda torna-se fácil. Portanto, se a quantidade de metal depositado aumenta durante a alta velocidade da tocha, o metal líquido depositado sobre cada borda da raiz da junta tende a fazer um contato, formando uma espécie de "ponte"

(como indicado nas Figuras 2.10 e 2.11), a qual é formada por tensão superficial, criando-se a poça de fusão. Durante o movimento de baixa velocidade, o arco quente é entregue para a poça e a superfície do chanfro, ajustando a geometria do passe de raiz, permitindo a confecção de soldas com raiz aceitável (Figura 2.13). Finalmente, os autores verificaram que as frequências de tecimento 2,5 Hz e 5 Hz foram mais adequadas, pois nestas duas condições o calor do arco aquece e funde tanto as laterais do chanfro quanto a raiz da junta. No caso de 10 Hz, o calor do arco é direcionado mais para as laterais do chanfro, podendo ocorrer a falta de fusão na raiz da junta.

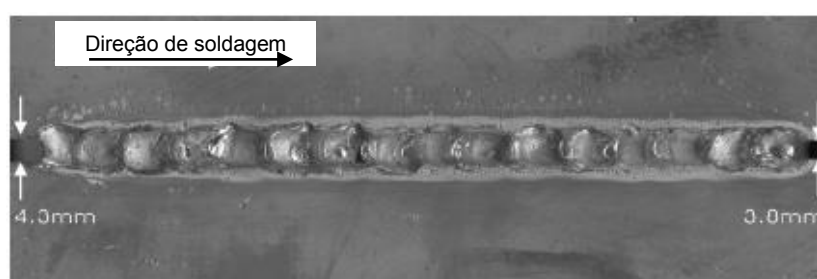


Figura 2.13 – Lado inverso resultante da solda de raiz (YAMANE et al., 2009)

De forma semelhante, Scotti et al. (2015) depositaram uma patente para uma técnica e um aparelho para soldagem MIG/MAG baseada no controle da poça de fusão pela troca do modo operacional do processo em sincronia com a posição da tocha na junta, assim distribuindo o calor na mesma e controlando suas propriedades físicas (entre elas a viscosidade) e evitando o colapso da poça mesmo sob diferentes tolerâncias geométricas no chanfro, sejam por desalinhamento ou desnivelamento. Uma das formas previstas para mudar a posição da tocha foi a combinação switchback com oscilação transversal, como ilustra a Figura 2.14. A soldagem nas laterais do chanfro é feita em um modo operacional de maior calor imposto e a central em modo operacional de menor calor imposto e pressão do arco. A técnica é proposta para juntas de topo, mas é também aplicável em juntas em ângulo ou sobrepostas. Os inventores reivindicam haverá mudança do modo operacional do processo de soldagem (polaridade e/ou transferência metálica) e não apenas de parâmetros (níveis de energia de soldagem) quando da mudança da posição da tocha.

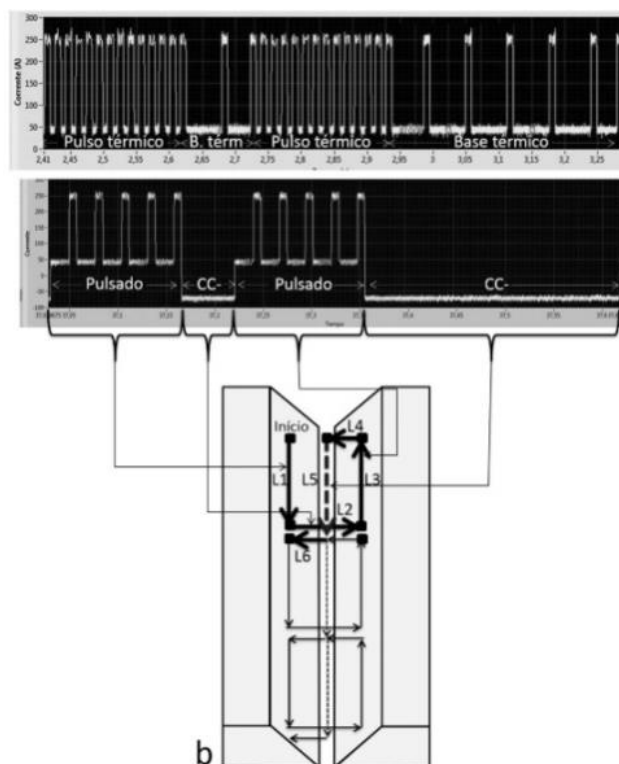


Figura 2.14 – Aplicação combinada do switchback, tecimento transversal e mudança do modo operacional, base térmica do modo duplo pulso ou polaridade negativa do modo CA no centro do chanfro e pulso térmico do modo duplo pulso ou polaridade positiva do modo CA nas laterais do chanfro (KOVALENKO et al, 2013)

2.3 Aspectos Metalúrgicos

Uma dúvida que surge a respeito do potencial da técnica *Switchback* é se ela permite trazer benefícios metalúrgicos para o cordão de solda. Sabe-se da literatura (por exemplo, KOU, 2003 e BARRA, 2003) que quando um passe de solda é realizado sobre o anterior (soldagem multipasses), este é tratado termicamente (a técnica denominada passe de revenido) e pode apresentar melhoras nas propriedades mecânicas do material soldado, como a sua tenacidade. No caso da Técnica *Switchback*, um passe (produzido com a reversão) acaba sendo realizado sobre parte do anterior (produzido com o avanço), embora, dependendo dos parâmetros switchback, pode haver um tratamento térmico (de diferentes magnitudes) ou até uma refusão. Entretanto, pouco se sabe dos efeitos positivos deste condicionamento térmico sobre o metal de solda.

2.3.1 Solidificação dos metais

Durante a solidificação em moldes, especialmente metálicos (lingoteiras), a primeira parte do líquido a solidificar é a camada em contato com as paredes do molde, que estão usualmente à temperatura ambiente ou próxima a isto. Isto resulta em um super-resfriamento intenso do metal e à geração de inúmeros pontos de nucleação e, conseqüentemente, de uma microestrutura de grãos equiaxiais finos, numa região chamada de zona coquilhada (PRATES, GARCIA, 2001), conforme esquematizado na Figura 2.15.

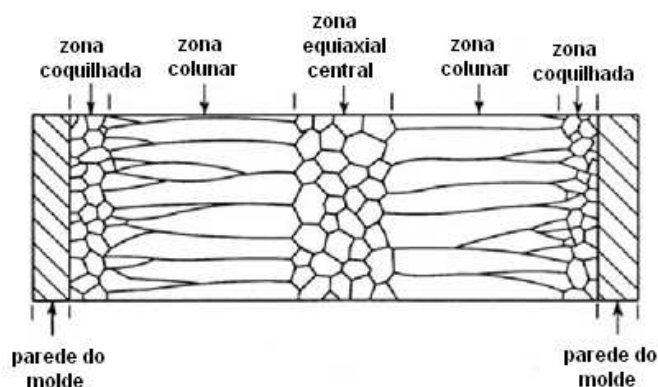


Figura 2.15 – Aspecto da estrutura de solidificação resultante em um lingote metálico (PRATES, 2001)

Ainda tomando como base o esquema da Figura 2.15, à medida que se afasta da superfície do molde, diminui-se a taxa de nucleação, favorecendo o crescimento dos grãos existentes. Assim, haverá uma diminuição na quantidade de grãos e o aumento de seu tamanho médio. Estes grãos crescem seguindo a direção de máxima extração de calor, possuindo uma forma colunar e dando origem à zona colunar do lingote. Nos metais puros, estes grãos colunares tendem a crescer até o centro do lingote. Porém, em ligas metálicas, a segregação de soluto, além de poder agir como nucleantes, pode alterar o ponto de fusão da liga ainda não solidificada no centro do lingote, aumentando a diferença entre a temperatura de fusão da solução e a temperatura que se encontra o líquido. Estes efeitos aumentam novamente a taxa de nucleação e impõem o ressurgimento de uma microestrutura de grãos equiaxiais no centro do lingote.

Na soldagem, a solidificação da poça de fusão ocorre sob alguns aspectos diferentemente da solidificação de um lingote. Isto porque, neste caso, a solidificação de um lingote é realizada quase em equilíbrio, em resfriamento lento, enquanto na soldagem o resfriamento é rápido, afastando-se de uma condição de equilíbrio. A solidificação de um lingote é um fenômeno típico de nucleação e crescimento, enquanto na poça de fusão

observa-se praticamente crescimento; a nucleação se dá partir dos grãos parcialmente fundidos do metal de base no limite da zona termicamente afetada (ZTA) e a poça de fusão, portanto na zona fundida há só crescimento. Quanto maior o tamanho dos grãos na ZTA, mais grosseira é granulação obtida no cordão de solda (WAINER, 1992).

Mas o modo de solidificação depende tanto da composição do metal como da velocidade de resfriamento. Analisando em nível microscópico a solidificação de um metal puro, verifica-se que a interface Sólido/Líquido (S/L) é geralmente planar. No caso de ligas, esta interface S/L assume outras formas de solidificação, como Planar, Celular, Dendrítica Colunar e Dendrítica Equiaxial (PRATES, 2001; GARCIA, 2001 e KOU, 2003), como ilustra a Figura 2.16.

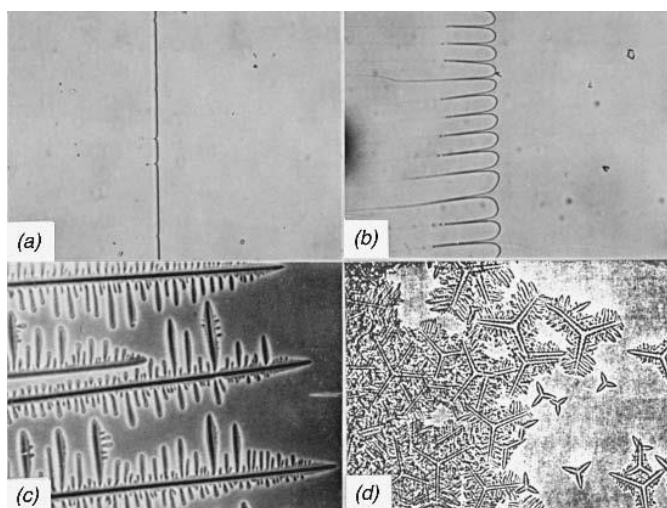


Figura 2.16 – Modo de solidificação de uma liga metálica: (a) Planar; (b) Celular; (c) Colunar dendrítico; e (d) Equiaxial dendrítico (KOU, 2003)

Uma importante teoria encontrada para explicar a transição da frente de solidificação planar para celular e, em seguida, para colunar dendrítica e, finalmente, para equiaxial dendrítica nas ligas é a do Super-resfriamento Constitucional de Chalmer. Por esta teoria, considera-se a solidificação de uma liga metálica de composição C_0 e apresentando coeficiente de distribuição de soluto menor que 1 ($k < 1$). Nesta condição, o sólido em crescimento na interface S/L não consegue absorver muito soluto. Então, ele acaba empurrando esta quantidade de soluto para o líquido na interface e esta quantidade passa a aumentar com o tempo de solidificação. De acordo com a teoria do Super-resfriamento Constitucional, este acúmulo de soluto na frente da interface promove uma instabilidade do crescimento planar passando para outros modos de solidificação (celular ou dendrítica), como indica a Figura 2.17, dependendo do grau do super-resfriamento. O super-

resfriamento constitucional ocorre em função da redução local da temperatura atual do líquido a frente da interface abaixo da temperatura líquidos de equilíbrio do material.

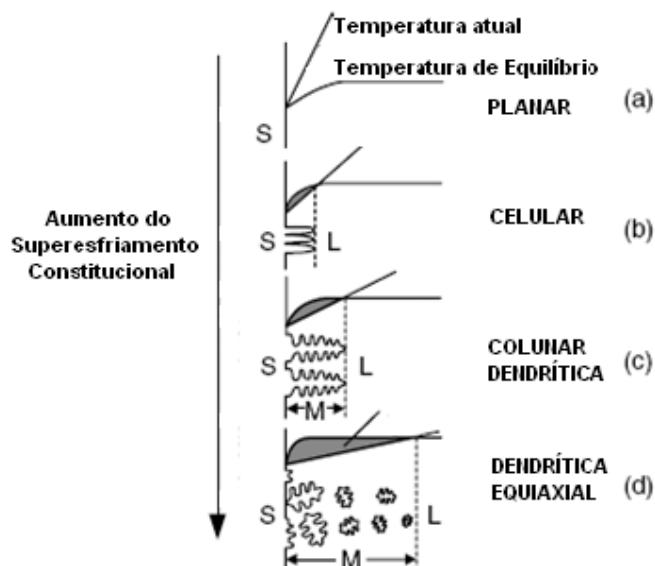


Figura 2.17 – Efeito do super-resfriamento constitucional sobre o modo de solidificação: (a) Planar; (b) Celular; (c) Colunar dendrítico; e (d) Equiaxial dendrítico (KOU, 2003)

A estabilidade do crescimento planar é obtida quando a equação 2.1 é satisfeita, onde G é o gradiente de temperatura no líquido, R é a velocidade ou taxa de crescimento de solidificação, T_L é a temperatura líquidos e D_L é a difusividade do soluto no líquido.

$$\frac{G}{R} \geq \frac{T_L}{D_L} \quad (2.1)$$

Logo, observa-se, por intermédio desta equação 2.1, que para baixos valores da relação G/R a instabilidade do crescimento planar é obtida. Isto pode ser conseguido com baixos valores de G no líquido à frente da interface e/ou com alto valor de R durante a solidificação. Portanto, percebe-se que a relação G/R governa o modo de solidificação nos metais. Temperatura líquidos do material muito alta e baixa difusividade do soluto no líquido também favorecem ao super-resfriamento constitucional. Por sua vez, o produto $G \times R$ representa a taxa de resfriamento durante a solidificação do metal líquido. É verificado na literatura que altas taxas de resfriamento (alto valor do produto $G \times R$) durante a solidificação de uma liga metálica promove a formação de uma estrutura celular ou dendrítica fina, como pode se observar nas Figuras 2.18 e 2.19.

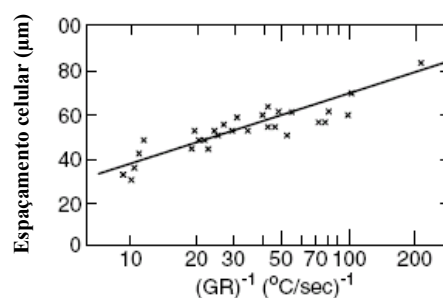


Figura 2.18 – Efeito do produto $G \times R$ sobre o espaçamento celular em uma liga Sn-Pb (KOU, 2003)

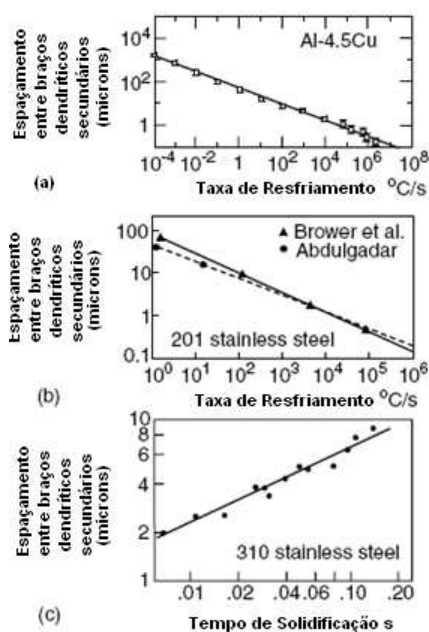


Figura 2.19 – Efeito da taxa de resfriamento ou tempo de solidificação sobre o espaçamento dendrítico; (a) Al-4,5%Cu; (b) Aço inoxidável 201; e (c) Aço inoxidável 310 (KOU, 2003)

O efeito do gradiente de temperatura (G) e da taxa de crescimento (R) sobre a microestrutura de solidificação é resumida na Figura 2.20. Portanto, a relação G/R domina o modo de solidificação enquanto o produto $G \times R$ determina o tamanho da estrutura de solidificação.

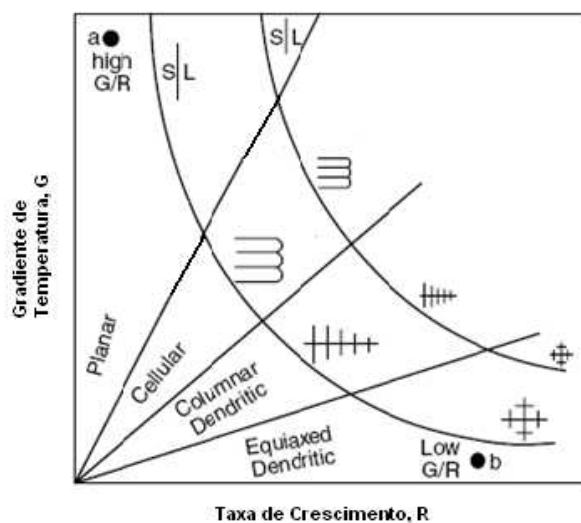


Figura 2.20 - Efeito do Gradiente de temperatura G e taxa de crescimento R sobre a morfologia e tamanho da microestrutura de solidificação (KOU, 2003)

2.3.2 Solidificação em soldagem a arco

Durante a soldagem a arco elétrico de um determinado material metálico, a região sob o arco é submetida a diferentes ciclos térmicos com diferentes níveis de temperatura máxima alcançada. Dependendo destes níveis de temperatura, diferentes regiões são definidas no material, como indicado na Figura 2.21

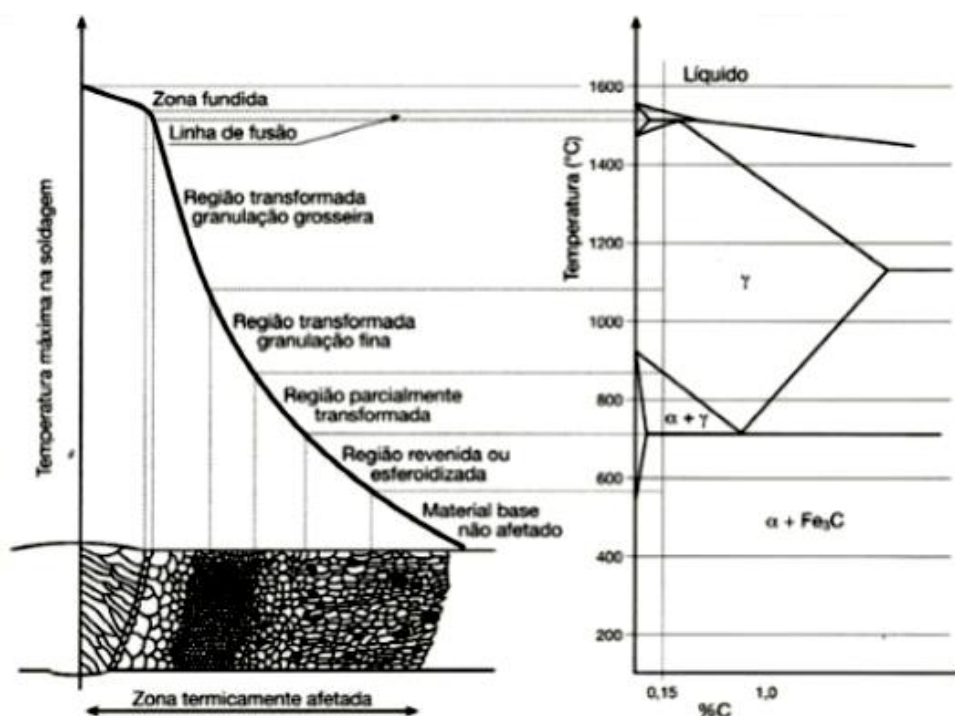


Figura 2.21 – Regiões de uma junta soldada (FAIRCHILD et al, 1991)

Na Zona Fundida (ZF), o material foi submetido a níveis de temperatura máxima igual ou superior à temperatura de fusão do material, ou seja, o mesmo foi submetido ao processo físico de fusão. Na Zona Termicamente Afetada (ZTA), o material não chega a fundir, pois os níveis de temperatura máxima não atingem a temperatura de fusão do material. Porém, as temperaturas alcançadas são suficientes para promover mudanças metalúrgicas no material. Finalmente, o Metal de Base (MB) é o material propriamente dito, ou seja, que não sofreu alterações metalúrgicas em função dos baixos níveis de temperatura atingido, menor que a temperatura de transformação do material. Com o deslocamento do arco elétrico, a região líquida do material (poça de fusão) começa a esfriar dando início à solidificação da ZF. A solidificação da ZF, em geral, inicia-se a partir do crescimento de grãos do metal de base, que crescem em uma direção preferencial [100]. Quando este crescimento preferencial dos grãos coincide com a direção de máxima extração de calor, perpendicular a poça de fusão devido ao máximo gradiente térmico nesta direção, este tipo de solidificação é conhecido como *nucleação epitaxial* ou *crescimento epitaxial* (KOU, 2003), como indicado nas Figuras 2.22 e 2.23.

Este tipo de estrutura de solidificação ocorre com menor dificuldade quando o metal líquido da poça de fusão tem a mesma estrutura cristalina do metal de base, ou seja, ambos apresentam célula cristalina CCC (Cúbica de Corpo Centrado) ou CFC (Cúbica de Face Centrada). Entretanto, junto com o crescimento epitaxial pode ocorrer o *crescimento competitivo* de grãos (Figura 2.22). Neste mecanismo, grãos que crescem em direção favorável a direção de máxima extração de calor (transversal a poça de fusão) colidem com aqueles que não seguem esta mesma direção, impedindo o crescimento destes. Este tipo de estrutura de solidificação ocorre quando o metal líquido da poça de fusão apresenta estrutura cristalina diferente do metal de base, por exemplo, metal líquido CCC e metal de base CFC.



Figura 2.22 – Ilustração da solidificação do metal de solda: crescimento epitaxial e crescimento competitivo (KOU, 2003)

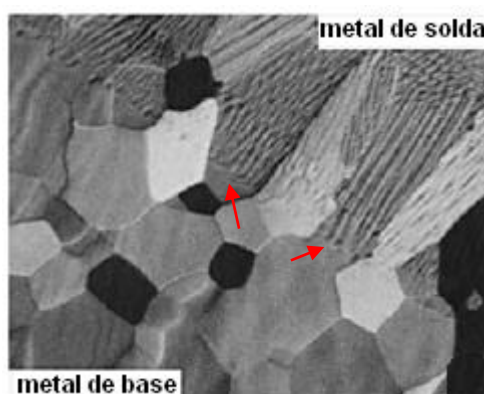


Figura 2.23 – Aspecto metalúrgico do crescimento epitaxial próximo a linha de fusão de uma solda produzida na soldagem por feixe de elétrons da liga C103 (KOU, 2003)

A solidificação do metal de solda também pode ocorrer por intermédio de outros mecanismos (KOU, 2003). Um deles é a nucleação heterogênea, devido à presença de impurezas e/ou soluto no meio líquido. Outro mecanismo é a nucleação decorrente do destacamento de grãos da zona parcialmente fundida (interface entre o metal líquido e a ZTA) e/ou fragmentação de dendritas que crescem a partir do metal de base. As Figuras 2.24 e 2.25 apresentam estes mecanismos de nucleação.



Figura 2.24 – Mecanismos de nucleação durante a soldagem (KOU, 2003)

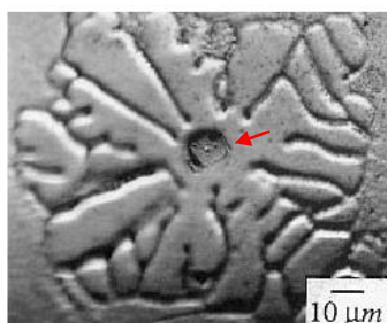


Figura 2.25 – Partícula TiN responsável pela nucleação heterogênea na soldagem GTAW do aço inoxidável ferrítico (KOU, 2003)

2.3.2.1 Formato da poça de fusão

A Figura 2.26 apresenta esquematicamente o formato de uma poça de fusão. Nesta, na linha ADB ocorre a fusão do metal base (frente de fusão) e na linha ACB ocorre a solidificação da solda (frente de solidificação). A velocidade de solidificação em um ponto na frente de solidificação é dada pela equação 2.2:

$$|R| = |V| \cdot \cos\theta \quad (2.2)$$

onde R é a velocidade de solidificação, V é a velocidade de soldagem e θ é o ângulo entre a normal no ponto considerado e o vetor velocidade de soldagem. Esta relação mostra que a velocidade de solidificação (R) da poça varia de zero, nas bordas da poça (pontos A e B), até o valor de V , no centro do cordão (ponto C).

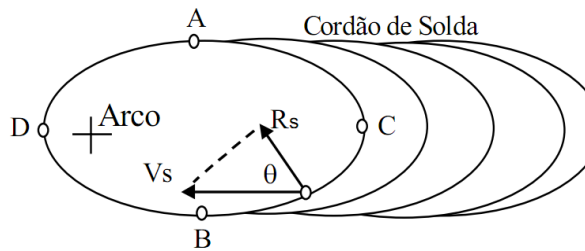


Figura 2.26 – Representação esquemática de uma poça de fusão (KOU, 2003)

O inverso acontece para o gradiente térmico G , ou seja, atinge o máximo valor nas bordas da poça de fusão enquanto no centro do cordão o seu valor é mínimo (Figura 2.27). Isto ocorre devido a maior distância entre a temperatura máxima alcançada no interior da poça e a temperatura no contorno da poça de fusão na linha central. Desta maneira, com a redução de G e aumento de R da linha de fusão para a linha central do cordão, a relação G/R diminui neste sentido. Assim, nas regiões próximas a linha de fusão, ou seja, nas bordas o modo de solidificação muda de planar para celular enquanto que para regiões mais afastadas, o modo de solidificação passa para colunar dendrítica e, em seguida, equiaxial dendrítica, como observado na Figura 2.28.



Figura 2.27 – Variações nos valores do gradiente de temperatura no líquido G e taxa de crescimento R ao longo do contorno da poça de fusão (KOU, 2003)

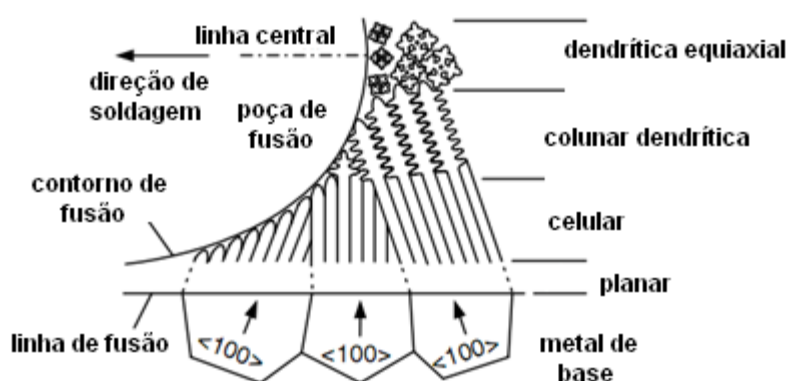


Figura 2.28 – Variação no modo de solidificação através da zona fundida (KOU, 2003)

De acordo com Kou (2003), dois formatos básicos para a poça de fusão podem ser observados durante a soldagem, isto é, formato elíptico e formato gota. Com a utilização de baixos níveis de velocidade de soldagem, o formato da poça de fusão é do tipo elíptica (Figura 2.29(a)). Nesta condição, o contorno da frente de solidificação da poça tem perfil arredondado, já que devido à baixa velocidade de movimento da fonte de calor (arco). Os grãos colunares crescem seguindo a direção perpendicular deste contorno em direção ao maior nível de extração de calor. Já com a utilização de altos níveis de velocidade de soldagem, o formato da poça de fusão é do tipo gota (Figura 2.29(b)). Nesta condição, os grãos crescem seguindo a direção perpendicular do contorno da poça, a qual tem um perfil reto. Assim, os grãos colunares crescem em linha reta e se encontram no centro do metal de solda.

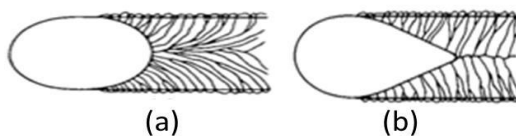


Figura 2.29 – Efeito da velocidade de soldagem sobre a estrutura de grãos no metal de solda, onde (a) representa baixas velocidades de soldagem, tipo elíptica e (b) altas velocidades, tipo gota (KOU, 2003)

Arata et al. (apud KOU, 2003) encontrou estas estruturas de solidificação em seu trabalho sobre a soldagem de alumínio de alta pureza com o processo TIG, como ilustrado na Figura 2.30. Quando se utilizou uma velocidade de soldagem alta de 1000 mm/min, a estrutura de solidificação formada foi de grãos colunares, que cresceram e se encontraram na linha central da solda. Quando se utilizou uma velocidade de 250 mm/min, os grãos colunares cresceram seguindo uma curva na direção de soldagem.

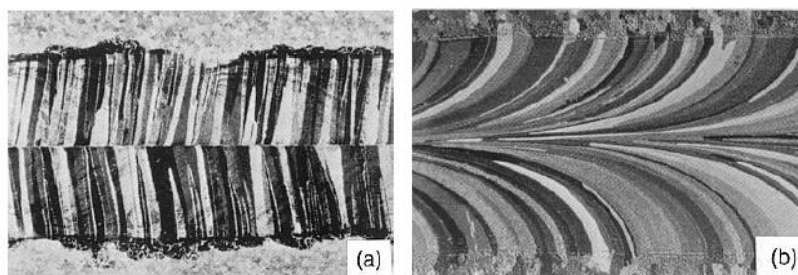


Figura 2.30 – Soldagem TIG do Al comercialmente puro: (a) Velocidade de soldagem de 100 cm/min; (b) velocidade de soldagem de 25 cm/min (KOU, 2003)

2.3.2.2 Modos de solidificação da poça fundida

Com a intensidade do super-resfriamento constitucional na poça de fusão, o modo de solidificação pode mudar de planar para celular, de celular para dendrítica colunar e de dendrítica colunar para dendrítica equiaxial. A Figura 2.31 apresenta esquematicamente esta mudança no modo de solidificação da poça de fusão com o super-resfriamento constitucional. O calor imposto e a velocidade de soldagem podem afetar significativamente o modo de solidificação do metal de solda. A solidificação vai de planar para celular e, posteriormente, dendrítica quando a taxa G/R diminui. Savage et al. (1979) observaram as mudanças na estrutura de solidificação do metal de solda na soldagem do aço HY-80. Eles notaram que a uma velocidade de soldagem mantida constante em 0,85 mm/s a microestrutura mudou de celular para dendrítica quando se aumentou a corrente de 150 A para 450 A. Isto foi justificado pela redução da taxa G/R devido a diminuição do gradiente térmico G no líquido com o aumento da energia imposta (em função do aumento da corrente).

Em relação à dimensão das células (solidificação celular) e do espaçamento entre braços dendríticos (solidificação dendrítica), ela reduz de proporção com o aumento na velocidade de soldagem, ou seja, com a diminuição do aporte de calor na junta, como indicado na Figura 2.32. Isto porque nestas condições ocorre o aumento na taxa de

resfriamento ($G \times R$). Assim, estruturas celular e dendrítica finas são obtidas com elevada velocidade de soldagem devido as altas taxas de resfriamento e estruturas celular e dendrítica grosseiras são obtidas com baixos níveis de velocidade de soldagem devido as baixas taxas de resfriamento.

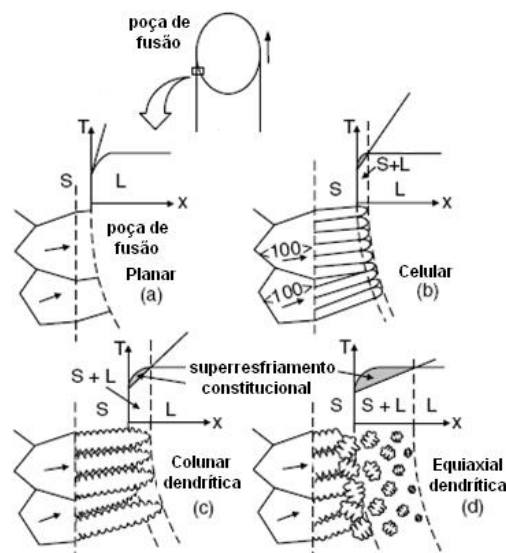


Figura 2.31 – Efeito do super-resfriamento constitucional sobre o modo de solidificação durante a soldagem: (a) Planar; (b) Celular; (c) Colunar dendrítica; e (d) equiaxial dendrítica (o super-resfriamento constitucional aumenta de (a) para (d)) (KOU, 2003)

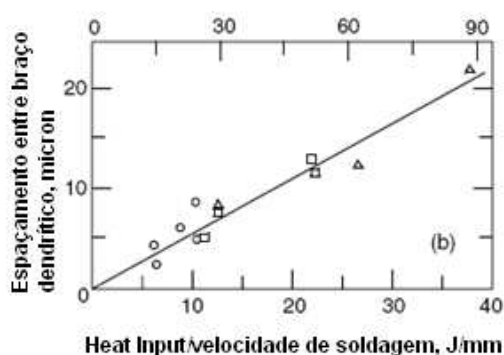


Figura 2.32 – Efeito do calor imposto por comprimento da solda sobre o espaçamento entre os braços dendríticos (KOU, 2003)

O refino da estrutura de solidificação é importante, pois melhora as propriedades mecânicas da junta soldada. Kou e Le (apud KOU, 2003) observaram a microestrutura obtida de soldas produzidas com a oscilação do arco na soldagem TIG da liga de Alumínio 2014. Eles verificaram que houve uma redução significativa no espaçamento entre os braços dendríticos com a oscilação do arco em baixa frequência (Figura 2.33). Esta redução

do espaçamento interdendrítico contribuiu para um aumento significativo na resistência a tração e ductilidade (Figura 2.34).

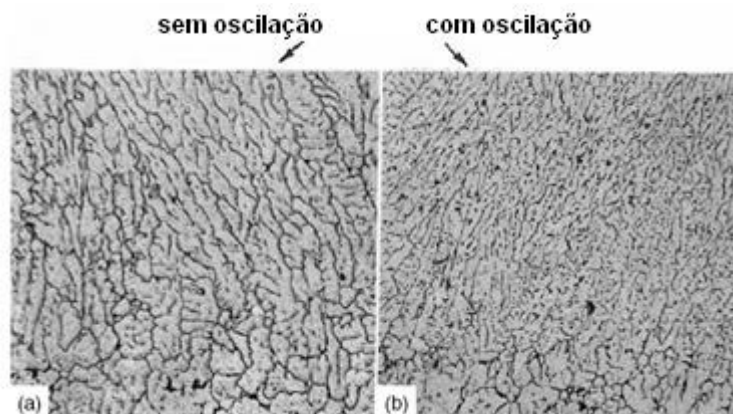


Figura 2.33 – Microestruturas (aumento 200x) próximas à linha de fusão de soldas produzidas com o processo TIG da liga de alumínio 2014: (a) dendritas grosseiras, sem oscilação do arco; (b) dendritas finas, com oscilação do arco (KOU, 2003)

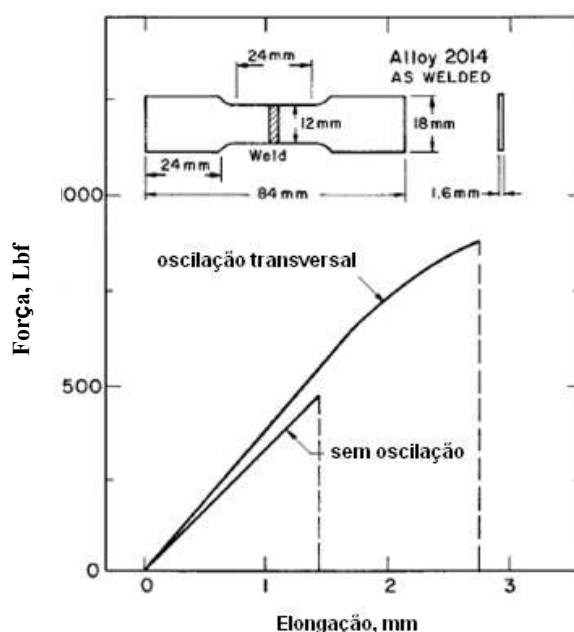


Figura 2.34 – Comparação da resistência à tração de corpos de provas soldados da liga alumínio 2014 sem oscilação do arco e com oscilação transversal do arco (KOU, 2003)

O efeito da vibração na poça de fusão sobre a morfologia da microestrutura foi avaliado por Kuo et al. (2008). Neste trabalho, foram induzidas vibrações durante a soldagem da liga Inconel 690 pelo processo TIG a partir de vibradores eletromagnéticos acoplados neste material. As vibrações foram produzidas em duas diferentes direções: vertical e horizontal.

Como resultados, eles observaram que houve a formação de uma estrutura de solidificação dendrítica em ambas as condições de vibração (Figura 2.35). Porém, dendritas finas foram encontradas nas soldas que foram submetidas à vibração no sentido horizontal. Já com as vibrações produzidas na direção vertical, a estrutura de solidificação se mostrou como dendritas grosseiras. Eles buscaram justificar tal observação por intermédio das diferenças entre os valores de G e R , as quais afetam o produto $G \times R$, durante os modos de vibração citados. Com a vibração na direção vertical houve uma maior mistura do metal líquido contido na linha central da poça de fusão (região de maior temperatura) com o metal líquido adjacente as bordas do metal de base (região de menor temperatura). Assim, a frente de solidificação era continuamente molhada por um líquido com elevada temperatura, o que favoreceu a baixa taxa de resfriamento (baixo valor do produto $G \times R$) e colaborando para a formação de uma estrutura dendrítica grosseira. Já para a condição de vibração na horizontal, houve uma menor mistura entre o líquido de alta temperatura contido na linha central da poça de fusão com o líquido de menor temperatura próximo a borda do metal de base. Desta maneira, a frente de solidificação era continuamente molhada por um líquido em menor temperatura propiciando em rápido resfriamento e rápida solidificação, favorecendo a formação de uma estrutura dendrítica refinada.

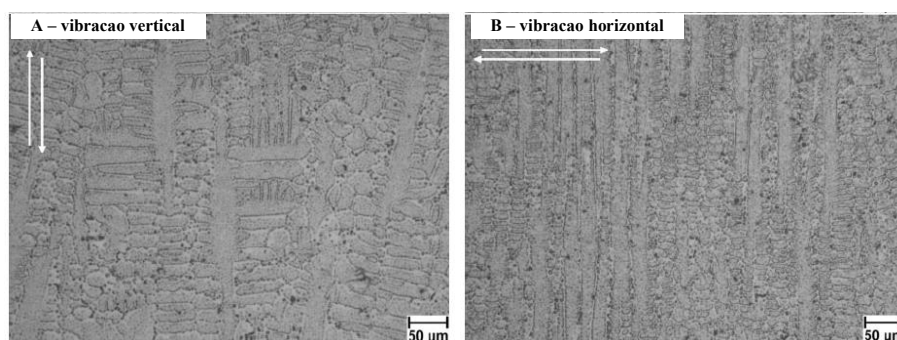


Figura 2.35 – (a) Microestrutura obtida com a vibração vertical; e (b) Microestrutura obtida com a vibração horizontal (KUO et al, 2008)

2.3.2. Transformações das fases no estado sólido no resfriamento

Transformações de fases ocorrem na zona fundida no resfriamento após a solidificação do metal de solda. Na soldagem de aço inoxidável (Fe-Cr-Ni), um grande percentual de níquel na liga favorece a formação de austenita como estrutura de solidificação primária. Ao contrário, um maior percentual de cromo permite a formação de ferrita como estrutura primária de solidificação (KOU, 2003). Quando do resfriamento já no estado sólido, em

aços inoxidáveis pode-se destacar as transformações de ferrita para austenita, e de austenita para ferrita na soldagem de aços carbono e aços baixa liga.

Kou e Le (apud KOU, 2003) analisaram a formação da estrutura primária de solidificação do metal de solda na soldagem dos aços inoxidável 309 (63%Fe-23%Cr-14%Ni) e 310 (55%Fe-25%Cr-20%Ni) com o processo de soldagem TIG. Eles observaram que, em ambos os casos, houve a formação de uma estrutura de solidificação colunar dendrítica sendo que na soldagem da liga 309 a estrutura primária observada foi a ferrita delta, em função dos maiores percentuais de cromo, enquanto que na liga 310 foi identificada como estrutura primária a austenita, devido o maior percentual de níquel (Figura 2.36).

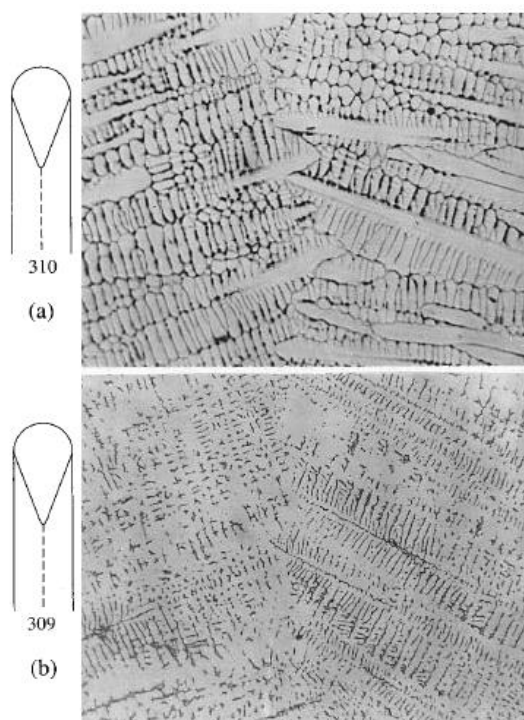


Figura 2.36 - Estrutura de solidificação (aumento 190x) da linha central da solda: (a) aço inoxidável 310; (b) aço inoxidável 309 (KOU, 2003)

Para o caso da soldagem de aços carbono e baixa liga, as fases comumente encontradas são ferrita primária de contorno de grão (PFG), ferrita poligonal intragranular (PFI), ferrita acicular (AF), bainita e martensita. A Figura 2.37 apresenta um esquema ilustrativo das mudanças de fases que ocorrem no metal de solda de aço baixo teor de carbono com o resfriamento contínuo (diagrama TRC - Transformação com Resfriamento Contínuo). A partir do resfriamento dos grãos de austenita que se encontra em alta temperatura, a ferrita nucleia nos contornos dos grãos da austenita e também no seu

interior. Em baixa temperatura, a mobilidade da frente de solidificação planar da ferrita de contorno de grão é reduzida e favorece a formação da ferrita de Widmanstätten (“side-plate”). A temperaturas ainda menores, o crescimento dessa ferrita (Widmanstätten) torna-se muito lento para o interior do grão, propiciando o surgimento da ferrita acicular. Os aspectos destas microestruturas podem ser visualizados na Figura 2.38. A ferrita acicular nucleia no interior do grão em função da presença de partículas de inclusão e crescem com orientação randômica (Figura 2.39).

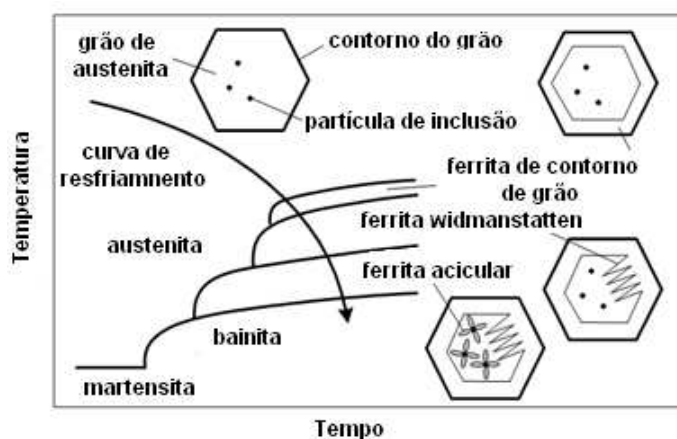


Figura 2.37 – Diagrama Transformação com Resfriamento Contínuo (TRC) para o metal de solda de aço baixo carbono (KOU, 2003)

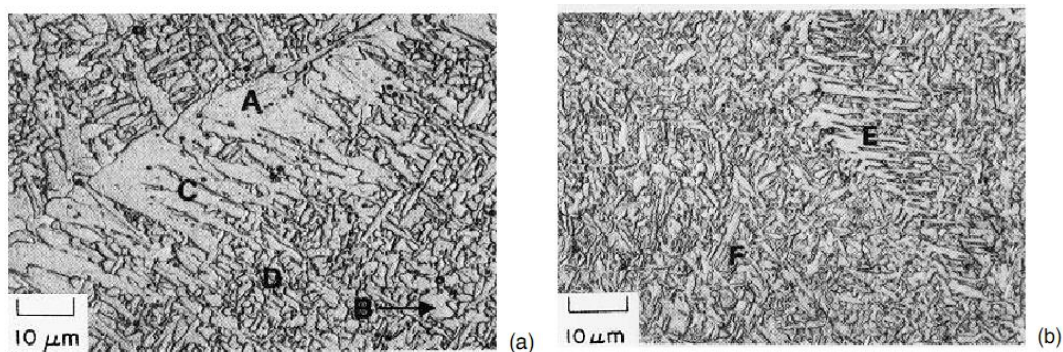


Figura 2.38 – Micrografias mostrando microestruturas típicas observadas em aços baixo teor de carbono: (a) ferrita de contorno de grão; (b) ferrita poligonal; (c) ferrita Widmanstätten; (d) ferrita acicular; (E) bainita superior; (F) bainita inferior (KOU, 2003)

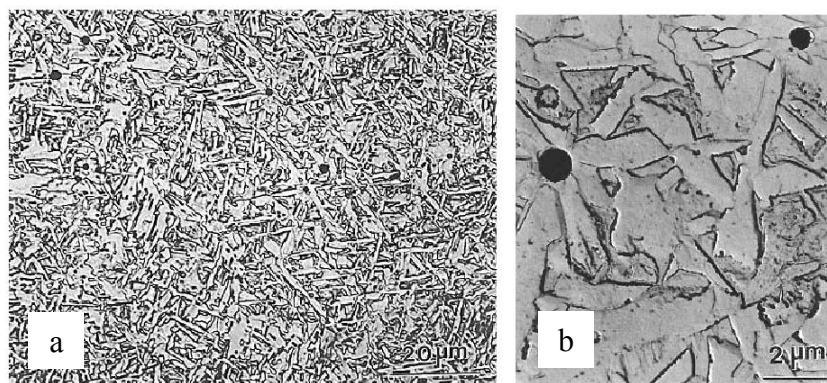


Figura 2.39 – (a) Presença predominante da ferrita acicular na microestrutura de soldas de aço baixa liga e aço baixo carbono;(b) Partículas de inclusão favorecendo a nucleação da ferrita acicular (KOU, 2003)

Dentre os fatores que podem afetar o desenvolvimento destas microestruturas no metal de solda pode-se destacar o tempo de esfriamento da solda, a adição de elementos de liga, o percentual de oxigênio presente e o tamanho dos grãos da austenita (BABU e BADESHIA,1991; BABU, 2004). Para longos tempos de esfriamento do metal de solda, a microestrutura predominante obtida no final da solidificação é a ferrita de Widmanstatten. Com a redução deste tempo, a microestrutura dominante passa a ser a ferrita acicular e, para tempos de esfriamento menores, obtém-se a bainita. Com a adição de elemento de liga no metal de solda a curva do diagrama TRC é deslocada para a direita, ou seja, para longos tempos de esfriamento. Baseado neste diagrama (Figura 2.40) pode-se observar que, para um mesmo tempo de esfriamento (curva 3) o produto predominante da transformação pode mudar de ferrita de contorno de grão e Widmanstatten (curva TRC tracejada da esquerda), para ferrita acicular (curva TRC central) e, finalmente, para bainita (curva TRC tracejada da direita).

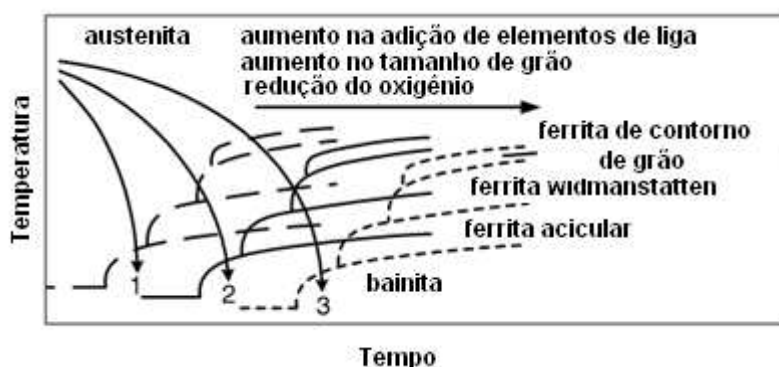


Figura 2.40 – Efeito dos elementos de liga, tamanho de grão e oxigênio sobre o diagrama TRC para metal de solda de aço baixo carbono (KOU, 2003)

Liu e Onson (apud KOU, 2003) observaram que o aumento no percentual de oxigênio no metal de solda promove um aumento na formação de partículas finas de inclusão de óxido. Estas partículas, dependendo da quantidade presente, favorecem a formação da ferrita acicular. Além disso, promovem a redução no tamanho dos grãos da austenita (Figura 2.41), aumentando assim a área do contorno de grão, o que favorece também a formação de ferrita de contorno de grão. Pesquisas realizadas com soldagem MIG/MAG utilizando como gás de proteção oxigênio e dióxido de carbono mostraram a existência de uma faixa limite de percentual de oxigênio no gás de proteção (oxigênio equivalente) que favorece a formação de ferrita acicular (Figura 2.42). A presença de ferrita acicular no metal de solda é importante, pois melhora as propriedades mecânicas do material como a resistência ao impacto (Figura 2.43).

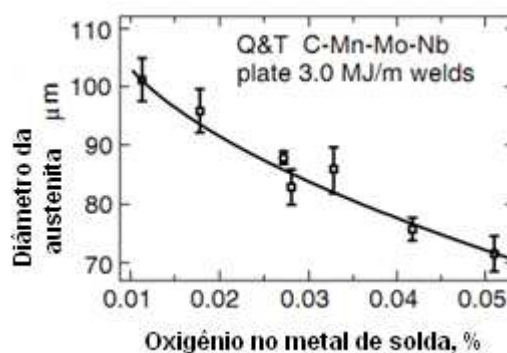


Figura 2.41 – Diâmetro dos grãos da austenita em função do oxigênio contido no metal de solda em soldagem ao arco submerso (KOU, 2003)

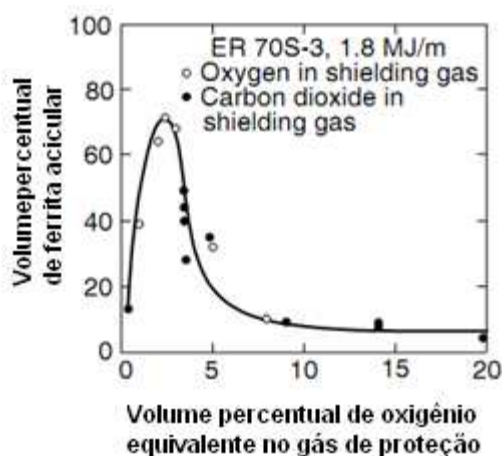


Figura 2.42 – Ferrita acicular em função do oxigênio equivalente do gás de proteção em soldagem MIG/MAG (KOU, 2003)

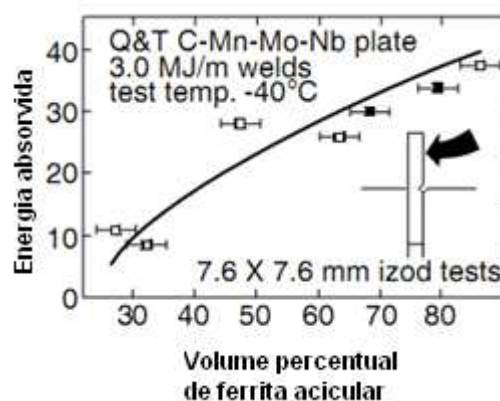


Figura 2.43 – Resistência ao impacto em função do volume de ferrita acicular presente em soldas produzidas com o processo de soldagem a arco submerso (KOU, 2003)

2.3.2 O processo de Refusão

A refusão é um meio para a fragmentação dendrítica, levando a formação de uma estrutura de solidificação colunar – equiaxial (RETTENMAYR, 2009). Pode acontecer naturalmente, como no caso em que durante a solidificação de um metal, a convecção do líquido faz a refusão de braços dendríticos secundários, acarretando seu destacamento para o meio líquido. Isto poderá ocasionar nucleação de novos grãos, refinando a estrutura do material. Ou pode ser forçada, fazendo a fonte de calor passar sobre um metal já previamente fundido e solidificado. Em soldagem, pode acontecer os dois casos.

Durante a soldagem, a estrutura de solidificação dendrítica pode ser formada e, com alguma agitação da poça de fusão (convecção), o metal líquido molha o metal em solidificação refundindo-o, provocando a quebra de dendritas ou o destacamento de grãos da zona parcialmente fundida. Uma das maneiras de promover a agitação da poça de fusão é através da oscilação do arco. Esta oscilação pode ser realizada de forma eletromagnética ou ainda de forma mecânica, ou seja, vibrando a tocha de soldagem. Davies e Garland (apud KOU, 2003) produziram o refinamento de grãos do metal de solda na soldagem TIG da liga Al-2,5%Mg a partir da vibração da tocha. A resistência a propagação de trincas de solidificação foi aumentada nesta liga durante a sua soldagem. A fragmentação dendrítica foi proposta como o mecanismo para o refinamento da microestrutura da zona fundida. A Figura 2.44 mostra o efeito da amplitude de vibração da tocha sobre o tamanho dos grãos obtidos nas soldagens realizadas por Davies e Garland com o processo TIG. Nota-se através desta figura que o aumento da amplitude de vibração da tocha, longitudinalmente ou

transversalmente à direção de soldagem, promoveu a redução no tamanho dos grãos, refinando a estrutura de solidificação formada.

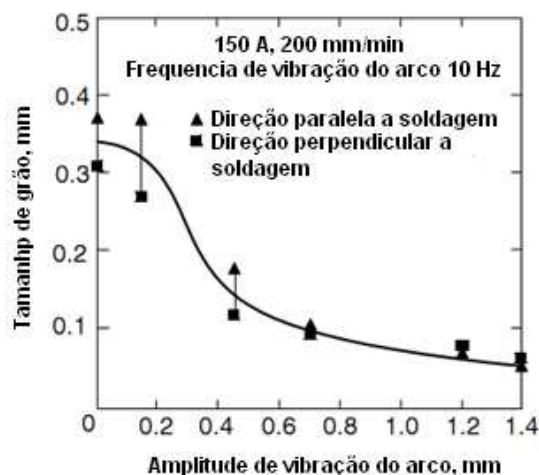


Figura 2.44 – Efeito da amplitude de vibração do arco sobre o tamanho dos grãos do metal de solda da liga Al-2,5Mg (KOU, 2003)

O processo de refusão pode ocorrer na soldagem com a utilização de corrente pulsada (SURESH et al., 2004). A frequência de pulsação afeta a distribuição de temperatura na poça de fusão. As variações cíclicas de temperatura que ocorre na frente de solidificação devido à corrente pulsada podem causar a refusão e quebrar o crescimento das dendritas, favorecendo ao refino do metal de solda. Isto é auxiliado pela ação mecânica da turbulência da poça de fusão, trazendo fragmentos de dendritas a frente da interface os quais tornam sítios de nucleação heterogênea, a qual eventualmente quebra o crescimento colunar.

Outros benefícios que o processo de refusão pode trazer para a solda está relacionado com a possibilidade de tratar termicamente uma região próxima à região que foi refundida. Isto é o que ocorre na soldagem multipasses, onde um passe refunde o anterior e promove uma recristalização dos grãos em função do seu aquecimento acima da temperatura de transformação do material por um determinado período (Figura 2.45). Furuya et al., avaliaram a tenacidade de soldas de aço produzidas com o processo MAG com gás de proteção CO₂. Soldagens em simples passe e multipasses foram realizadas com os mesmos níveis de energia de soldagem (2 kJ/mm e 4 kJ/mm). Como resultado, os autores verificaram que a tenacidade das soldas produzidas (utilizando a técnica multipasses) não sofreu mudança significativa em comparação à tenacidade do metal de base, mesmo aumentando a energia de soldagem. O mesmo não ocorreu para as soldagens em simples passe, pois a tenacidade foi fortemente reduzida. Eles justificaram o melhor resultado obtido na soldagem multipasses pela recristalização ocorrida no metal de solda devido ao

reaquecimento da região fundida. Outros trabalhos (por exemplo, ALBUQUERQUE et al., 2003) têm mostrado resultados similares, ou seja, apontam a importância da aplicação da técnica multipasse durante a soldagem para melhorar a tenacidade do metal de solda, através do processo de recristalização de grãos.

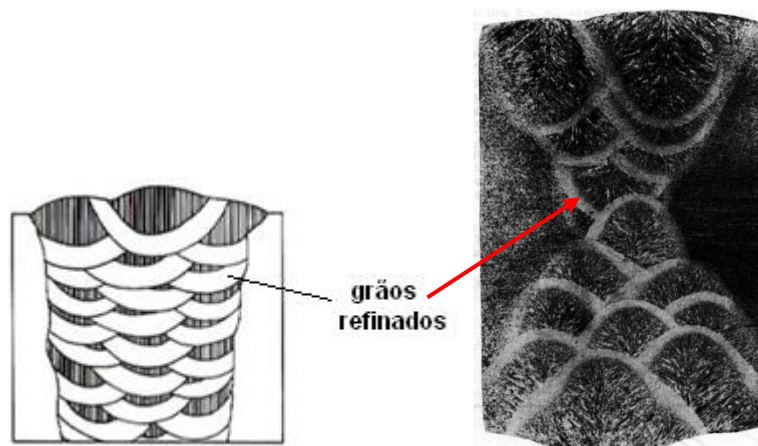


Figura 2.45 – Efeito da soldagem multipasses sobre a microestrutura do metal de solda (AWS, 1992)

Silva, et al. (2001) investigaram a aplicação de uma técnica variante da técnica de dupla camada na soldagem de tubulações de aço 5%Cr e 0,5% Mo. Esta técnica consistiu na refusão da última camada do metal de solda depositado com o processo Eletrodo Revestido (soldagem multipasses), a partir da soldagem TIG autógeno. A finalidade foi reduzir a extensão da ZTA com grãos grosseiros (ZTA-GG) observada sempre na última camada e, ainda, reduzir o nível de dureza nesta região. Inicialmente, soldagens com o processo TIG autógeno foram realizadas com diferentes correntes (160 A à 230 A) sobre cordões depositados com o processo Eletrodo Revestido. Por macrografia, foram medidas as extensões da ZTA com grãos finos (ZTA-GF) para as diferentes correntes. Os autores escolheram as correntes de 190 A e 200 A para realizar o passe de revenimento na junta soldada da tubulação, por acreditarem que a ZTA-GF (obtida com refusão pelo processo TIG) poderia revenir totalmente a ZTA-GG do último passe. Nesta técnica, a ideia foi aplicar o passe de revenimento com energia de soldagem de forma decrescente. Por isso, aplicou-se primeiro o passe TIG com 200 A e, em seguida, com 190 A. Os autores conseguiram reduzir a dureza da ZTA-GG para valores abaixo de 330 Vickers (a máxima recomendada era de 350 Vickers), menor do que os 400 Vickers, geralmente obtidos quando não se aplica a refusão na última camada.

A refusão também pode ser utilizada para conseguir um endurecimento da superfície do material, deixando-o mais resistente ao desgaste (ADAMIAK, 2007; ADAMIAK, 2009 e

BOCHNOWSKI, 2009). Adamiak (2009), em seu trabalho, utilizou o processo de soldagem TIG para refundir a superfície de placas de aço (C15, C45, C90U). Durante os ensaios, ele variou a corrente e a velocidade de soldagem (a corrente foi variada em 50 A, 100 A, 200 A e 300 A e a velocidade de soldagem em 20 cm/min, 40 cm/min, 60 cm/min e 80 cm/min). Após as soldagens, amostras retiradas das placas foram submetidas ao ensaio de desgaste. Ele observou que todas as amostras que sofreram refusão com o processo TIG apresentaram uma maior resistência ao desgaste em relação aquelas que não foram submetidas ao processo de refusão. Isto porque com a refusão a arco elétrico TIG, o resfriamento da poça de fusão é rápido e, desse modo, a superfície obtida é mais dura. Observou ainda que este aumento da dureza está ligado com a melhor combinação das variáveis estudadas, ou seja, da seleção correta da corrente e velocidade de soldagem. Os melhores resultados foram conseguidos para uma corrente de 100 A.

Bochnowski (2010), também utilizou a soldagem TIG para realizar a refusão de placas de teste de aço ferramenta com 1,18% de carbono (C120U). Durante os testes, ele também procurou variar a corrente de soldagem em vários níveis (60 A, 80A, 100 A e 110 A). Foi verificado que o aumento da corrente propiciou em uma maior profundidade da área refundida, porém, houve uma redução da dureza superficial. De acordo com o autor isto ocorreu em função da redução da taxa de esfriamento. Os maiores níveis de dureza superficial foram obtidos quando foram utilizadas as correntes de 60 A e 80 A. Isto foi justificado pela presença da martensita, em função da maior taxa de esfriamento. Os menores níveis de dureza foram encontrados com as correntes de 100 A e 110 A. Neste caso, foi observado a presença da bainita inferior, que tem menor dureza em relação a martensita.

Sun et al. (2003) avaliaram o efeito da refusão na soldagem de aços duplex (40% ferrita e 60% austenita). Eles utilizaram a combinação entre os processos de soldagem Plasma e TIG. A tocha a arco plasma iniciava a soldagem. Logo em seguida, o cordão produzido por arco plasma era imediatamente refundido por outro arco elétrico, de uma tocha TIG. A distância entre as duas tochas foi modificada durante os experimentos (25 mm, 30 mm e 35 mm). A corrente utilizada na soldagem TIG também foi alterada (60 A, 90 A e 120 A). Os efeitos destas variáveis sobre a microestrutura e a resistência a corrosão do metal de solda foram observados. Os resultados mostraram, inicialmente, que a refusão realizada pelo arco TIG permitiu melhorar a geometria dos cordões produzidos com o arco Plasma (sem a utilização do arco TIG houve o surgimento de mordeduras no cordão, e com a utilização do arco TIG, ou seja, refusão do metal solidificado, este defeito foi eliminado). Em seguida, eles observaram que a taxa de corrosão dos cordões refundidos foi aumentada após a soldagem em relação ao metal de base. Porém, houve condições em que esta taxa aumentou pouco,

sem afetar a integridade da solda. Os melhores resultados foram encontrados para um comprimento entre tochas de 25 mm e correntes de 80 A e 120 A. A tendência desta taxa foi aumentar com o aumento da distância entre as tochas e diminuir com o aumento da corrente. Eles justificaram tal resultado com a taxa de esfriamento dos cordões refundidos. Para menores distâncias entre tocha e maiores correntes, a taxa de esfriamento foi reduzida. Assim, houve um tempo maior para a transformação da ferrita de primeira fase para austenita, garantindo um balanço aproximado de 40% ferrita e 60% austenita na região refundida.

2.4 O efeito “humping” (costa de dragão)

É conhecido da literatura que o aumento da velocidade de soldagem torna-se inviável até certo nível, pois acima deste valor limite ocorre a formação de soldas que apresentam geometria irregular caracterizadas pelo efeito “*humping*”, também conhecido como “*costa de dragão*”, como ilustrado na Figura 2.46. Nguyen (2005) definiu este defeito como sendo uma ondulação periódica que surge no metal de solda e está relacionado com a alta velocidade de deslocamento da tocha durante a soldagem. Talvez, com a aplicação da técnica *Switchback* junto com a soldagem MIG/MAG, pode-se conseguir um atraso na formação deste defeito, ou seja, pode ser possível aumentar a faixa limite de velocidade de soldagem, o que acarretaria em aumento de produtividade do processo. Entretanto, ainda não foi possível verificar na literatura trabalhos que comprovem este efeito de melhoria na redução de “humping” a partir do emprego desta técnica.

Este fenômeno já foi observado em diferentes processos de soldagem em alta velocidade como o Laser, Feixe de elétrons, TIG e MIG/MAG. Entretanto, Humping também foi verificado em determinadas condições de baixa velocidade de soldagem. Savage (1979), trabalhando com a soldagem TIG autógena de aço carbono, mapeou a ocorrência deste defeito a partir da utilização de vários níveis de velocidade de soldagem e corrente. Ele observou que mesmo com a aplicação de baixos níveis de velocidade de soldagem no processo TIG foi possível a obtenção de Humping. Entretanto, isto somente ocorreu em função dos elevados níveis de corrente utilizados. Ainda em seu trabalho, Savage (1979) verificou que para baixos níveis de velocidade de soldagem, uma redução nos níveis de corrente produziu cordões com boa geometria, ou seja, sem a presença de Humping e mordeduras. Somente a utilização de elevados níveis de velocidade de soldagem foi capaz de promover a formação de Humping na soldagem TIG em baixa corrente.

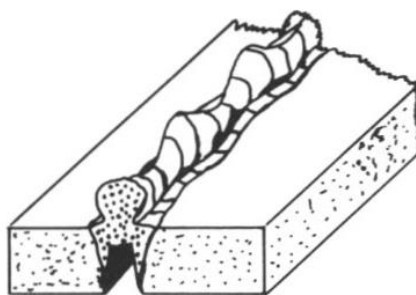


Figura 2.46 – Ilustração de Humping no metal de solda (NGUYEN, 2005)

Além da velocidade de soldagem e a alta corrente, outros parâmetros que podem contribuir para a formação deste defeito são o tipo e composição do gás de proteção, o ângulo da tocha, a geometria da ponta do eletrodo de tungstênio no TIG, a composição química do material de base e de adição, o tipo de junta, a posição de soldagem e a pressão ambiente. A composição do gás de proteção tem mostrado um impacto significativo na formação do Humping. Bradstreet (1968) realizou experimentos com a utilização de várias composições da mistura Argônio-Oxigênio como gás de proteção, bem como Dióxido de Carbono puro na soldagem MIG/MAG. Ele notou que o aumento dos níveis de Oxigênio na mistura aumentou a formação de Humping. Em atmosfera de CO_2 , entretanto, foi dificultado a formação de Humping. Nguyen (2005) também observou algo similar em sua pesquisa. Ele estudou os efeitos de diferentes atmosferas gasosas (Ar puro, mistura MMG 92%Ar + 8% CO_2 e TIME 65%Ar + 8% CO_2 + 26,5% He + 0,5% O_2) na formação de Humping durante a soldagem MIG/MAG em alta velocidade. Similar à Bradstreet, ele verificou que a presença de Dióxido de Carbono no gás de proteção (MMG e TIME) durante a soldagem MIG/MAG de aço carbono atrasou a formação de Humping, ou seja, aumentou a faixa limite de velocidade, nos menores níveis de potência do arco avaliados, sendo este efeito mais perceptível quando se utilizou o gás TIME (Figura 2.47).

Para uma potência do arco de 6,0 kW, o limite encontrado para a velocidade nas soldagens com argônio puro foi cerca de 10 mm/s. Nesta mesma potência foram encontrados 44 mm/s e 50 mm/s para os limites de velocidades quando utilizado, respectivamente, MMG e TIME. Isto representou um aumento na produtividade entre 440% a 600% em relação à soldagem com argônio puro. As imagens obtidas de algumas soldas produzidas no trabalho de Nguyen, com argônio puro em 6,3 kW e onde foi obtido um valor de 10 mm/s para a velocidade limite são apresentadas na Figura 2.48.

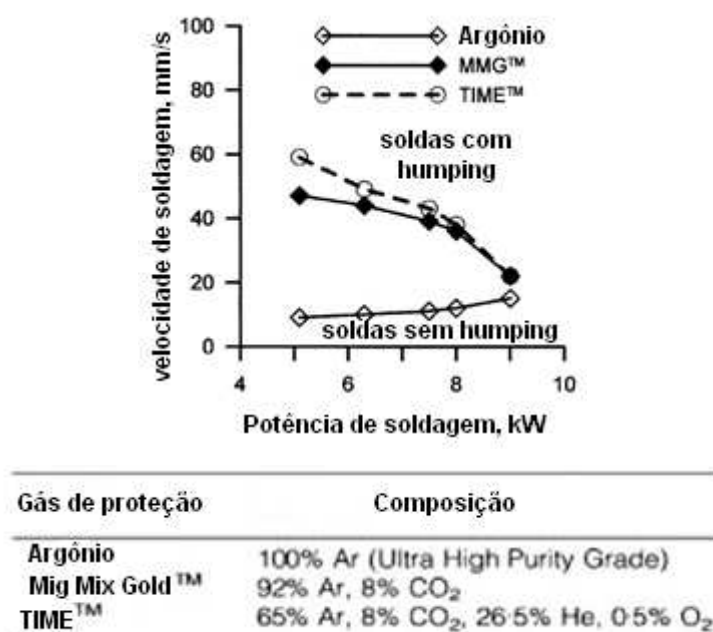


Figura 2.47 – Influência da composição química do gás de proteção sobre a ocorrência de “humping” em soldagem MIG/MAG de aço carbono (NGUYEN, 2005)

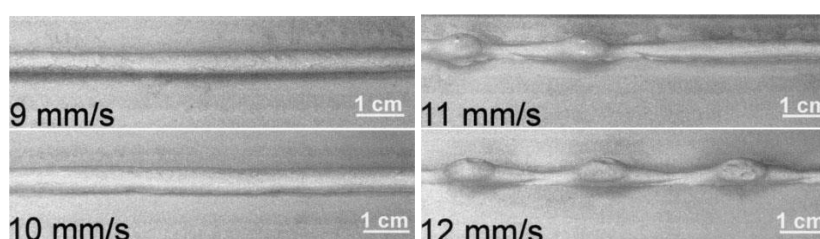


Figura 2.48 – Vista superior de soldas MIG/MAG produzidas com o uso de proteção argônio puro sobre chapas de aço, mostrando ocorrência de “humping” a partir de 11 mm/s (NGUYEN, 2005)

Entretanto, esta maior vantagem do gás TIME em aumentar mais significativamente a faixa limite de velocidade reduziu com o aumento da potência do arco. O mesmo ocorreu para as soldagens realizadas com o gás MMG onde, em ambos os casos, a velocidade limite reduziu para próximo de 20 mm/s em 9 kW aproximando-se bastante da velocidade limite obtido para o argônio puro na mesma potência. Uma das justificativas empregadas por Nguyen para explicar o atraso na formação do Humping em baixos níveis de potência do arco foi a redução da tensão superficial da poça de fusão quando foram utilizados os gases ativos MMG e TIME. Ele observou a redução do ângulo de contato (θ_c) entre o metal de solda e metal de base quando os gases MMG e TIME foram utilizados, ou seja, a presença de CO₂ no gás de proteção permitiu a formação de uma poça de fusão com boa fluidez

facilitando o melhor molhamento do metal líquido sobre o metal de base e dificultando o acúmulo de material fundido para geração de Humping (Figura 2.49).

Savage (1979) em seus experimentos com a soldagem TIG encontrou grande diferença na obtenção da velocidade limite para a formação de Humping entre os gases Argônio e Hélio (Figura 2.50). Com a utilização do gás Hélio no lugar do argônio houve um relevante aumento da velocidade limite. Ele explica que tal fato pode estar relacionado a uma menor pressão do arco sobre a poça de fusão, para um determinado nível de corrente, quando se utiliza Hélio como gás de proteção na soldagem TIG (Figura 2.51). Isto acontece em função de sua baixa densidade quando comparado ao argônio. Ele observou ainda que a geometria da ponta do eletrodo de Tungstênio afeta a pressão do arco sobre a poça de fusão. Pontas afiadas, com ângulo agudo, promovem uma alta distribuição de pressão do arco. Ele concluiu que pontas agudas criam maior força do arco sobre o metal líquido e reduz a velocidade limite para a formação de “humping”.

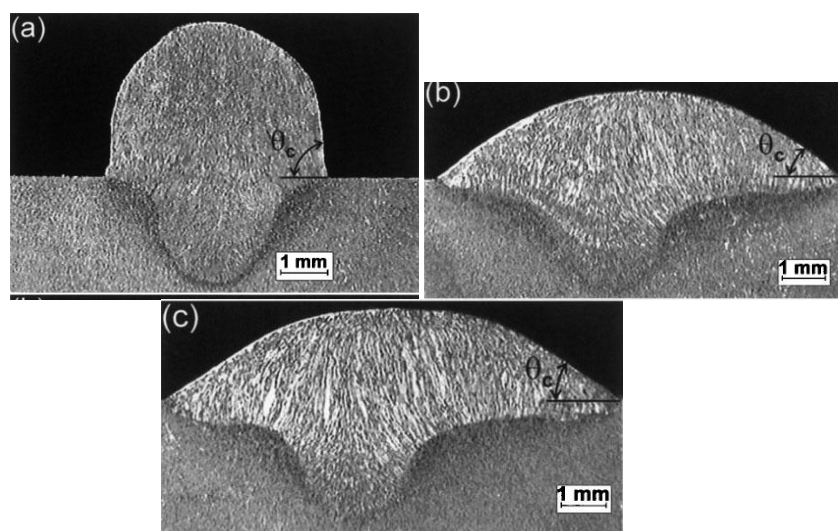


Figura 2.49 – Seção transversal de soldas produzidas no processo MIG/MAG sobre chapas de aço (ângulo de contato obtido entre metal de solda e metal de base) com 7,5 kW e 11 mm/s: (a) Argônio puro; (b) MMG; e (c) TIME (NGUYEN, 2005)

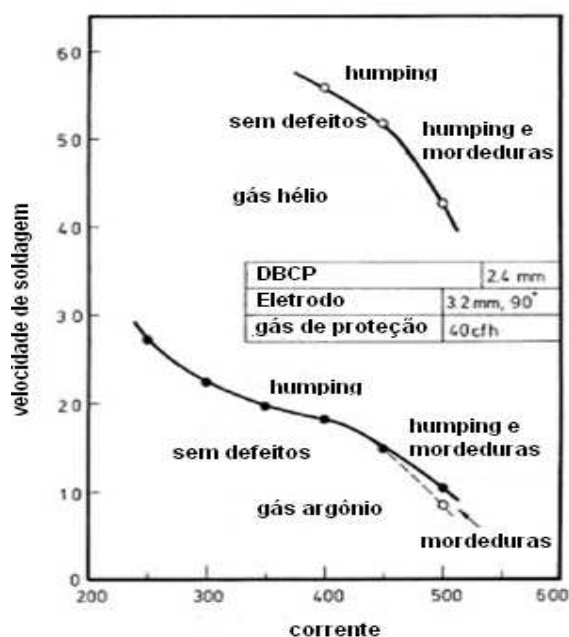


Figura 2.50– Efeito do gás de proteção na formação de “humping” durante a soldagem TIG (SAVAGE, 1979)

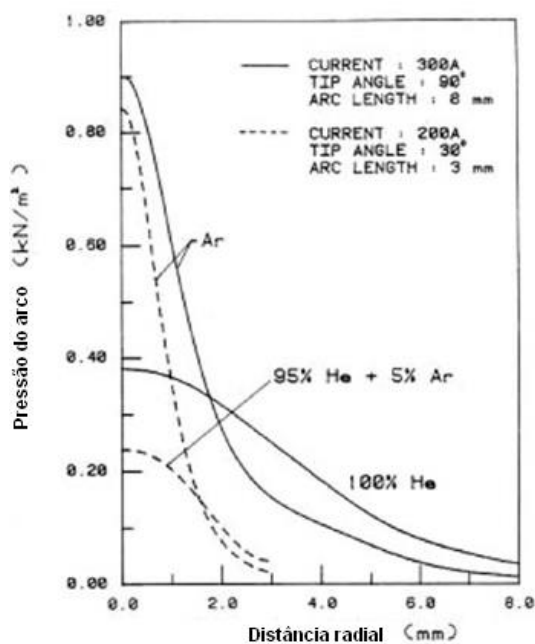


Figura 2.51 – Efeito do gás de proteção na distribuição da pressão do arco durante a soldagem TIG (SAVAGE, 1979)

Nguyen (2005) também realizou soldagens em dutos de forma automatizada com o processo MIG/MAG em alta velocidade com a finalidade de avaliar o efeito da posição de soldagem na formação de “humping”. Diferentes atmosferas gasosas foram utilizadas e, a partir da inclinação do ângulo da tocha em 10° graus, foram produzidas soldas nas posições

vertical descendente, plana e vertical ascendente. A tocha permaneceu fixa em uma posição enquanto o duto rotacionava automaticamente. Foi observado que a soldagem vertical descendente com ângulo de inclinação da tocha em 10° permitiu os maiores valores para a velocidade limite para a ocorrência de “humping”, em qualquer atmosfera gasosa utilizada. Nguyen procurou justificar tal observação pela atuação desfavorável da força gravitacional no acúmulo de metal fundido atrás do arco. Ao contrário, na posição vertical ascendente a força gravitacional atua a favor do acúmulo do metal fundido atrás do arco, aumentando as chances de “humping” (Figura 2.52).

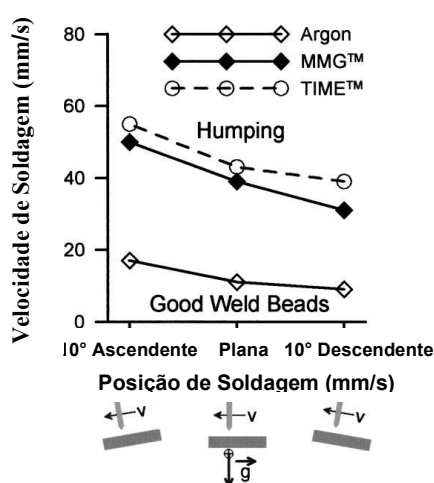


Figura 2.52 – Influência da posição de soldagem no limite de velocidade de soldagem. Potência de 7,5kW (NGUYEN, 2005)

CAPÍTULO III

Equipamentos, Insumos e Parametrização da Soldagem MIG/MAG

3.1 Bancada de soldagem

A maioria das soldagens foram realizadas de forma automatizada (robotizada) em placas de teste de aço carbono ABNT 1020, com o auxílio de uma bancada de soldagem apresentada na Figura 3.1. Foram utilizados uma fonte de soldagem eletrônica com comando sinérgico para MIG pulsado (A), um cabeçote alimentador de arame(B), uma tocha de soldagem com ângulo reto (C), um robô com seis graus de liberdade (D) e, finalmente, um suporte de fixação das placas de teste (E).

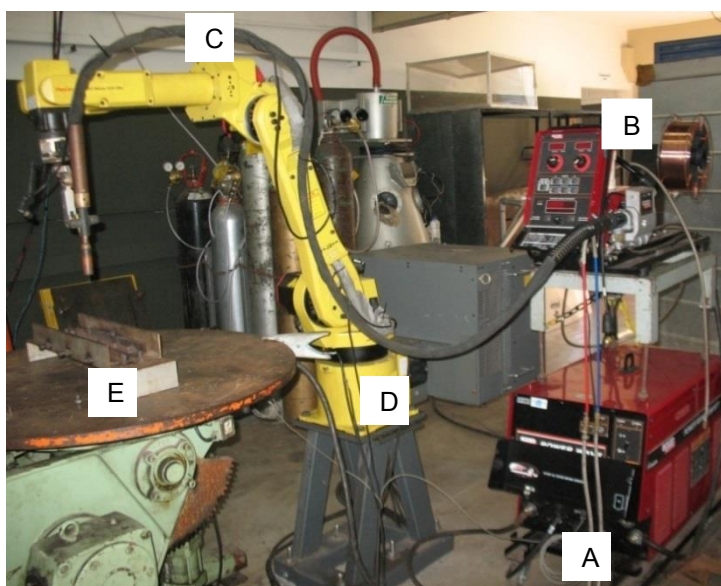


Figura 3.1 – Bancada de soldagem utilizada durante os experimentos

Como alternativa, na parte final do trabalho foi usado em substituição ao robô um arranjo mecanizado com dois carros de movimentação de tocha sobrepostos ao mesmo eixo longitudinal, como ilustrado pela Figura 3.2. Neste arranjo planejado, e já testado anteriormente em trabalhos de outros autores, como Teixeira (2018) e Sodré (2018), o carro de baixo é engrenado em um trilho do tipo cremalheira e é responsável pelo movimento linear da tocha ao longo da junta no sentido de soldagem. O carro de cima, que é normalmente utilizado para tecimentos convencionais de solda (oscilação transversal), permite uma regulação sem programação complicada da amplitude, tempo de paradas e frequência da oscilação switchback. Adicionalmente, o mecanismo do carro de cima possibilita a utilização de tempos de aceleração e desaceleração menores em relação ao robô, por possuir uma baixa inércia. Neste caso, para a realização dos movimentos de switchback, o carro de cima é posicionado transversalmente para impor oscilação na direção longitudinal ao longo da junta. Como os movimentos dos dois carros são integrados, porém independentes, consegue-se movimentar a tocha ao longo da junta no sentido de soldagem, mas com movimentos repetitivos de avanço e reversão (switchback).

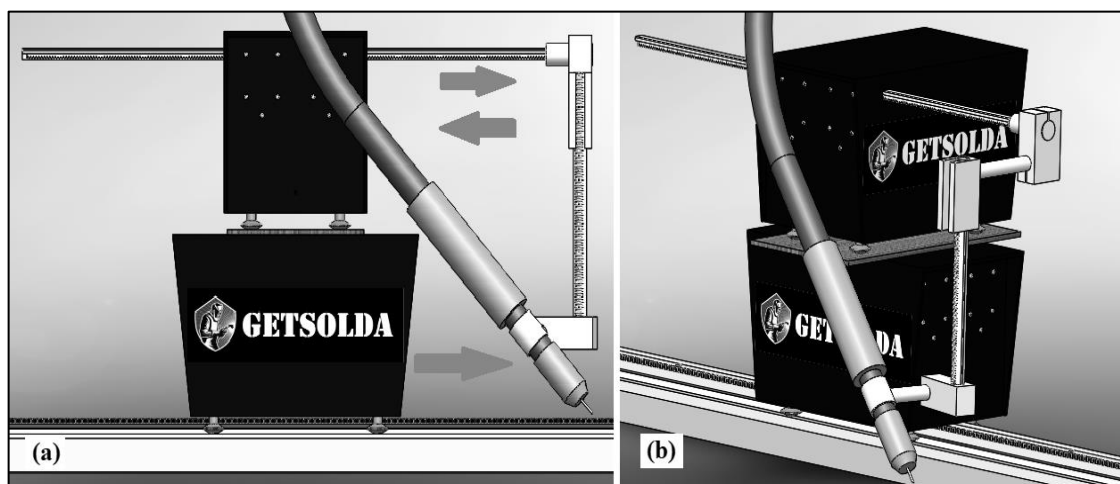


Figura 3.2 - Esquema do arranjo mecanizado de movimentação da tocha para a técnica switchback, (a) vista lateral e (b) vista em perspectiva (Teixeira, 2018)

3.2 Medição termográfica

Em algumas etapas deste trabalho foi necessário o uso de câmera termográfica (câmera infravermelho), a qual foi posicionada sob as placas de teste (Figura 3.3). A sua finalidade foi de adquirir a temperatura durante a soldagem com a técnica switchback. Uma câmera foi utilizada por fazer o registro do campo de temperatura, ou seja, fazer medições de temperatura em vários lugares ao mesmo tempo, enquanto termopares ou pirômetros fazem a medição de forma pontual. As câmeras infravermelhas utilizam sensores que transformam a intensidade de radiação (neste caso, na faixa do infravermelho) em sinal de temperatura. Neste trabalho, foram utilizadas duas câmeras infravermelhas, uma na fase inicial do trabalho, pertencente ao LAPROSOLDA-UFU, modelo FLIR A325 (Fig. 3.4) com sensor microbolometer. Esta câmera permite analisar uma faixa do espectro de 7,5 a 13 μm (infravermelho longo), com uma resolução de 320 x 240 pixels, uma taxa de aquisição de até 60 Hz e uma acurácia de ± 2 °C. Sua análise é dividida em 3 níveis de temperatura (-20 °C a 120 °C, 0 °C a 350 °C e 300 °C a 2000 °C). A outra, pertencente a Faculdade de Engenharia Mecânica da UFPA, modelo FLIRT 440, com taxa de aquisição até 30 fps (frames por segundo) e uma análise dividida em 3 campos de temperatura (-20 °C a 120 °C, 0 °C a 650 °C e 200 °C a 1300 °C), foi utilizada na fase final dos experimentos.

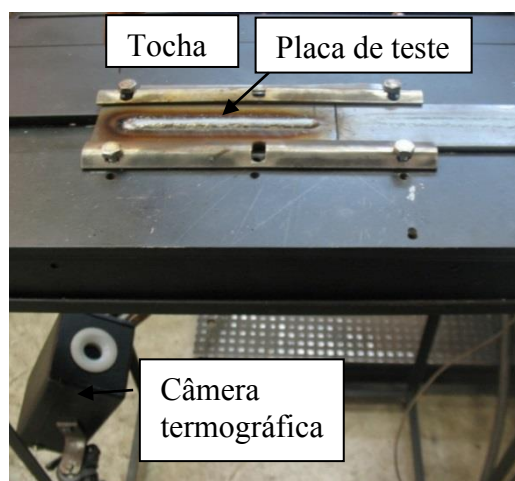


Figura 3.3 – Posicionamento da câmera termográfica para determinação de campo de temperatura no verso da chapa de teste em soldagens



Figura 3.4 – Câmera infravermelha FLIR A325

A câmera modelo FLIR A 325 é controlada por meio de um software chamado Thermacam Research 2.9 (Fig. 3.5), pelo qual são inseridos os parâmetros da análise de temperatura por radiação. Os parâmetros necessários para compilação dos dados da termocâmera pelo software são:

- Emissividade da superfície;
- Distância da câmera/peça;
- Temperatura ambiente;
- Umidade do ar;
- Transmitância (caso utilize filtros);

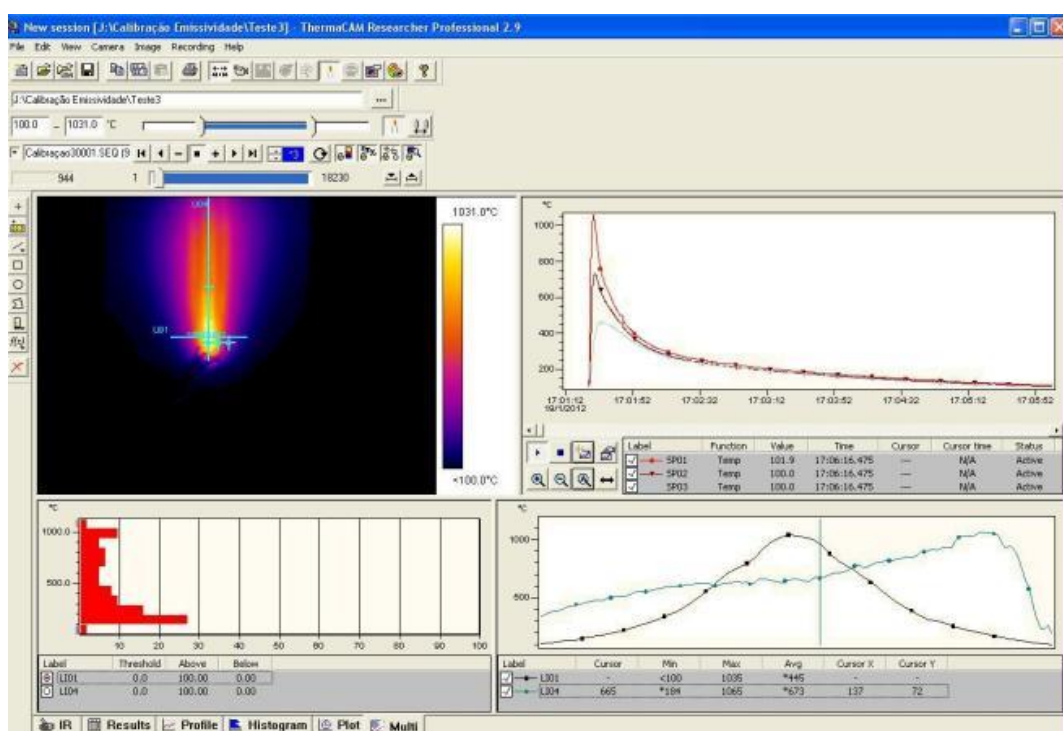


Figura 3.5 – Interface do software Thermocam Research 2.9

Para utilizar esta câmera, inicialmente foi necessário construir uma caixa de proteção (Figura 3.6), para impedir que respingos atingissem a câmera. Para proteger a lente da câmera, foi ainda necessário um filtro de proteção com alta transmitância de radiação infravermelho. Esse filtro é fabricado de germânio. Ele foi escolhido por deixar passar a radiação infravermelha em uma faixa de 8 a 12 μm , ou seja, na mesma faixa operacional da câmera (7,5 a 13 μm), com uma transmitância média de 90%. A curva de transmitância deste filtro é visualizada na Figura 3.7.

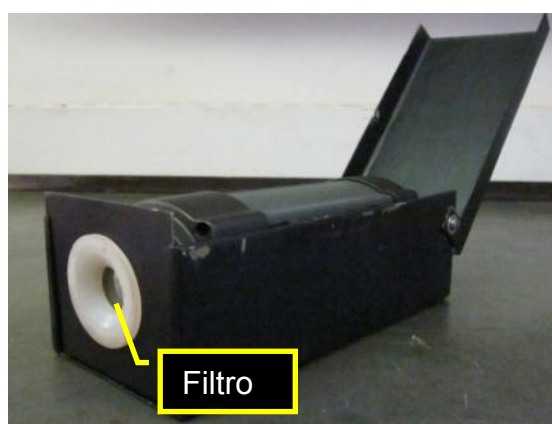


Figura 3.6 – Caixa de proteção da câmera com um filtro de germânio

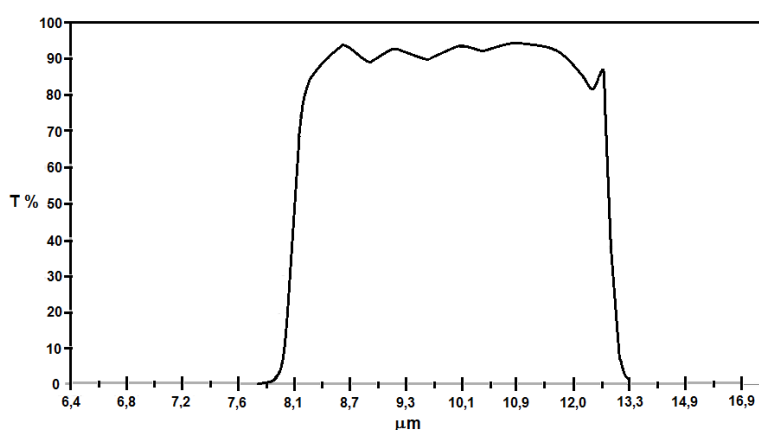


Figura 3.7 – Valor da transmitância da lente versus comprimento de onda para a lente de germânio

Foi fabricada uma mesa para a fixação desta câmera, tornando possível a filmagem sob a placa de teste. A mesa tem uma abertura no meio que pode ser regulada

manualmente de acordo com a largura das placas de teste. O esquema da montagem da mesa para a filmagem com a câmera por infravermelho pode ser observada na Figura 3.8.

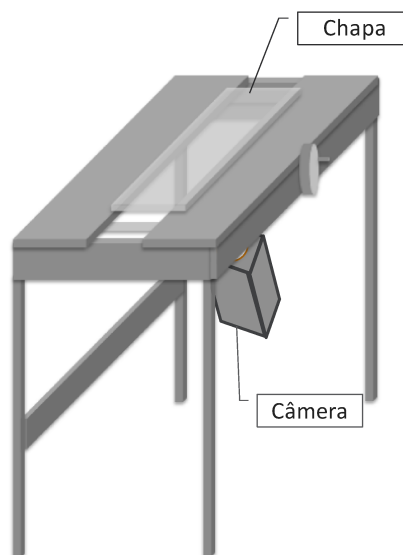


Figura 3.8 - Mesa para a filmagem com a câmera infravermelho

3.3 Gás de proteção

Foi utilizada a mistura gasosa Ar+5%O₂. Esta mistura foi adotada em todos os experimentos por ser uma mistura indicada para a soldagem de aços com o processo MIG/MAG em corrente pulsada. Antes das soldagens, a composição química foi conferida através de um medidor comercial de composição química de mistura gasosa (Oxi-baby). A Tabela 3.1 apresenta o percentual de O₂ na mistura utilizada, após a realização de 5 medições. A vazão adotada durante as soldagens foi de 15 l/min. Antes de cada soldagem, a vazão foi verificada por intermédio de um fluxômetro.

Tabela 3.1 – Verificação da composição química da mistura gasosa utilizada

Gases	Medições					Média
O ₂	5,4%	5,5%	5,4%	5,4%	5,4%	5,4 ± 0,0
Ar	94,6%	94,5%	94,6%	94,6%	94,6%	94,6 ± 0,0
CO ₂	0%	0%	0%	0,1%	0%	0 ± 0

3.4 Metais de base e de adição

O metal de base utilizado nos experimentos foi um aço baixo teor de carbono, classe ABNT 1020, pois a finalidade era de se conhecer os fundamentos da técnica, motivo pelo qual buscou-se realizar os ensaios em um material que fosse facilmente encontrado no mercado e com um baixo custo. Com relação ao metal de adição, foi utilizado o arame da classe AWS ER 70S-6, com 1,2 mm de diâmetro.

3.5 Definição dos parâmetros de corrente pulsada

As soldagens foram realizadas com o processo MIG/MAG em corrente pulsada. A definição para trabalhar em corrente pulsada está ligada ao fato de que a mesma permite uma transferência metálica no modo goticular (spray) de forma controlada (uma gota por pulso) e com menor corrente média em relação à soldagem MIG/MAG goticular. Com isso, menor é o calor imposto para a placa de teste, permitindo a soldagem de chapas finas, com menor nível de distorções. Também, devido ao controle da transferência de metal, é possível se soldar fora da posição plana. No presente trabalho, soldagens foram realizadas em chapas com pequena espessura, na posição plana e fora desta posição e, por isso, o emprego da corrente pulsada. Além disso, nos artigos que abordam a técnica switchback, os autores utilizam o processo MIG/MAG Pulsado em seus experimentos, sugerindo se conseguir melhores resultados com a técnica switchback quando a corrente pulsada é utilizada.

Durante todos os experimentos, foi utilizada uma fonte de soldagem comercial, trabalhando no modo pulsado sinérgico (Programa 22 da fonte de soldagem Power Wave 460 STT). Desta maneira, os parâmetros de corrente pulsada (corrente de pico, corrente de base, tempo de pico e tempo de base) foram definidos pelo próprio equipamento, a partir da escolha de dados de entrada no painel central realizada pelo operador. Estes dados são a velocidade de alimentação do arame, a mistura gasosa, o material a ser soldado e o diâmetro do eletrodo. A Tabela 3.2 apresenta as condições operacionais para a corrente pulsada utilizada e a Figura 3.8 apresenta o comportamento para a corrente e tensão obtidos com estes parâmetros. A regulagem da frequência no referido equipamento foi realizada a partir do ajuste do dispositivo “arcontrol” localizado no painel frontal. Nele, pode-se variar a frequência de – 10 até + 10 (Tabela 3.3).

Tabela 3.2 - Condições de corrente pulsada

Valim (m/min)	Im (A)	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)
4,0	145	510	75	1,7	9,4

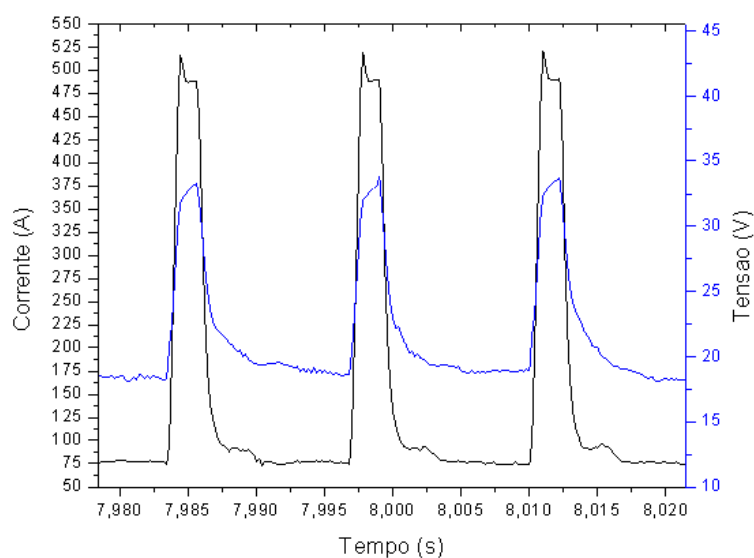


Figura 3.8 – Comportamentos da corrente e da tensão obtidos na soldagem MIG/MAG Pulsado, para o modo sinérgico da fonte Power Wave 460 STT utilizada

Tabela 3.3 – Ajuste da frequência de pulsação a partir da regulagem do parâmetro “arccontrol” do equipamento de soldagem utilizado

	ARC CONTROL= -10	ARC CONTROL= +10
<i>Frequência (Hz)</i>	83	116
<i>Período (ms)</i>	12	8,6
<i>Corrente de pico (A)</i>	520	500
<i>Corrente de base (A)</i>	80	50

3.6 Definição das variáveis da soldagem MIG/MAG

3.6.1 Velocidade de alimentação do arame

A velocidade de alimentação do arame foi mantida constante em 4,0 m/min. Este valor

foi estabelecido por ter sido utilizado em trabalhos anteriores com a técnica switchback no LAPROSOLDA (BRUECKER, 2007). Soldagens preliminares com o processo MIG/MAG Pulsado foram realizadas com esta velocidade de alimentação com a finalidade verificar a resposta do cabeçote alimentador do arame ao longo da soldagem. Um sensor para medir a velocidade do arame (tacômetro) foi utilizado. A Figura 3.9 apresenta o comportamento da velocidade de alimentação do arame regulada em 4,0 m/min durante a execução de uma solda de 140 mm de comprimento, com uma velocidade de soldagem de 28 cm/min. Nota-se, por intermédio dessa figura, que a alimentação do arame fornecida pelo cabeçote foi de 4,0 m/min, indicando a regularidade de sua resposta.

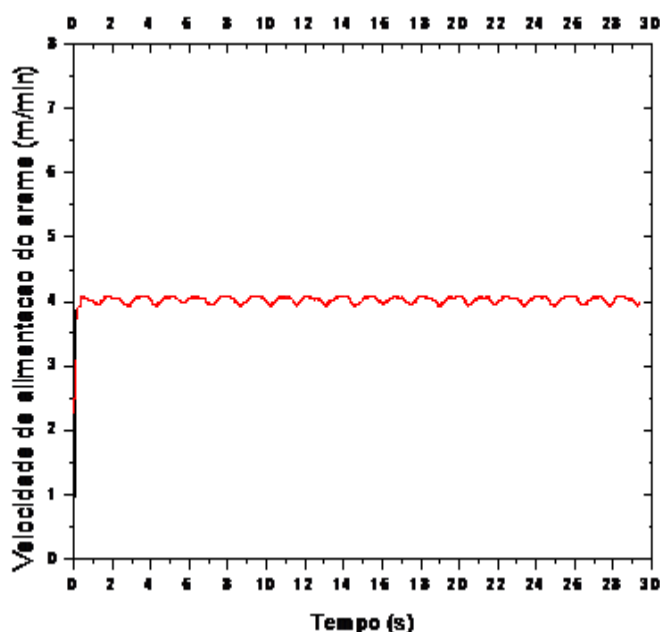


Figura 3.9 – Oscilograma da velocidade de alimentação do arame, para soldagem MIG/MAG Pulsado regulada para 4 m/min (corrente média almejada de 150 A)

3.6.2 Velocidade de soldagem

A maioria das soldagens foram realizadas de forma robotizada. Então, inicialmente, procurou-se observar a resposta do robô para uma dada velocidade de soldagem empregada na tocha. Sensores magnéticos interfaceados com um cronômetro digital foram utilizados para adquirir os tempos de deslocamento da tocha dentro de dois diferentes comprimentos, 200 mm e 100 mm, como esquematizado na Figura 3.10. Foram realizados um total de 5 medidas para o tempo em cada comprimento avaliado. Com a definição das distâncias percorridas pela tocha e dos tempos obtidos, foram calculadas as velocidades em cada condição e, também, a velocidade média. Os resultados são mostrados nas Tabela

3.4 e 3.5. Eles indicam que a velocidade empregada na tocha por intermédio do robô variou muito pouco, permanecendo praticamente constante. Estes resultados mostraram a confiabilidade do uso deste equipamento durante as soldagens.

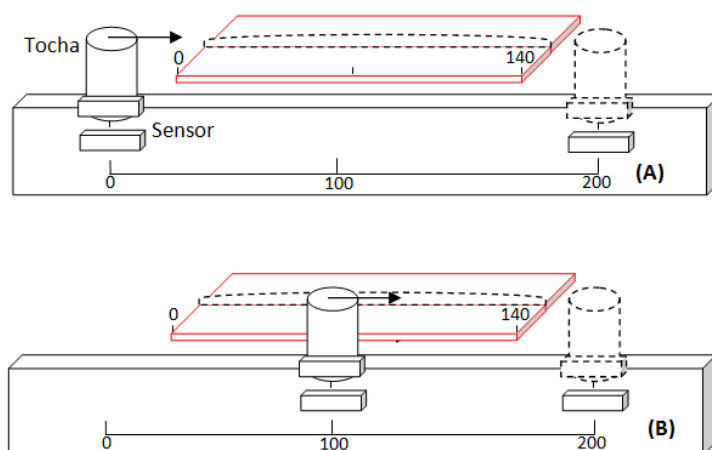


Figura 3.10 – Ilustração do posicionamento do sensor magnético nos dois diferentes percursos: (A) 200 mm e (B) 100 mm (comprimento do cordão de 140 mm)

Tabela 3.4 – Verificação da velocidade de soldagem para um percurso de 200 mm

Teste	Tempo (s)	Percurso (mm)	Velocidade de soldagem regulada (cm/min)	Velocidade de soldagem medida (cm/min)
1	43,21	200	28	27,77
2	43,13	200	28	27,82
3	43,36	200	28	27,68
4	43,17	200	28	27,80
5	43,28	200	28	27,73
Média	---	---	---	27,76 ± 0,06

Tabela 3.5 – Verificação da velocidade de soldagem para um percurso de 100 mm

Teste	Tempo (s)	Espaco (mm)	Velocidade de soldagem regulada (cm/min)	Velocidade de soldagem medida (cm/min)
1	21,64	100	28	27,73
2	21,73	100	28	27,61
3	21,76	100	28	27,57
4	21,76	100	28	27,57
5	21,75	100	28	27,59
Média	---	---	---	27,61 ± 0,06

Em seguida, o mesmo procedimento foi realizado para observar o comportamento da velocidade de soldagem durante a técnica switchback. Mas, primeiramente, foi necessário calcular as velocidades da tocha durante as etapas de avanço e reversão, para diferentes velocidades equivalentes de soldagem.

a) Velocidade equivalente de soldagem

Velocidade equivalente é definida como aquela com a qual pode ser produzido um determinado comprimento de solda pela técnica switchback em um mesmo tempo em que se gastaria para fazer um outro cordão, com o mesmo comprimento, sem o emprego da técnica. Porém, para uma determinada velocidade equivalente, é necessário definir a velocidade da tocha durante as etapas de avanço e reversão.

b) Cálculo das velocidades de avanço e reversão

Para conhecer a velocidade a ser empregada na tocha, deve-se levar em consideração os seguintes passos:

- 1 – Para um determinado comprimento de cordão, saber o número de reversões (n_R) e de avanços (n_A) que a tocha irá realizar;
- 2 – Multiplicar o número de reversões pelo comprimento da reversão utilizada (C_R). Assim, tem-se o comprimento total de reversões realizadas (C_{tR}) (repetir este procedimento para saber o comprimento total de avanços, (C_{tA});
- 3 – Soma-se os comprimentos totais de reversão (C_{tR}) e de avanço (C_{tA}), para, desta maneira, ter-se o comprimento total de percurso da tocha (C_{tPT});
- 4 – Diante de uma velocidade equivalente (V_{eq}) que se deseja usar e de um comprimento

de cordão estabelecido (C_c), calcula-se o tempo de soldagem (t_s);

5 – Definido o tempo de soldagem e o comprimento total de percurso da tocha (a partir do item 3), encontra-se a velocidade a ser empregada na tocha durante as etapas de avanço (V_A) e reversão (V_R).

Foram, assim, encontrados diferentes valores para a velocidade da tocha (durante as etapas de avanço e de reversão) em diferentes velocidades equivalente de soldagem (Tabela 3.6). Em seguida, as velocidades de avanço e de reversão foram testadas com a utilização do robô. Para esta análise, repetiu-se o mesmo procedimento explicado anteriormente, porém somente para um comprimento de 100 mm. O resultado pode ser observado na Tabela 3.6. Verifica-se nessa tabela que foi necessário regular a velocidade, tanto no avanço quanto na reversão da tocha, em torno de 3 cm/min. A necessidade em aumentar a velocidade da tocha para uma determinada velocidade equivalente pode ser entendida pela inércia do robô, devido as constantes reversões.

Tabela 3.6 – Velocidades da tocha para diferentes velocidades equivalente de soldagem testados para um comprimento de avanço de 10 mm e comprimento de reversão de 5 mm

V_{eq} (cm/min)	C_c (mm)	t_s (s)	n_A	n_R	C_A (mm)	C_R (mm)	Ct_A (mm)	Ct_R (mm)	V_A (cm/min)	V_R (cm/min)
25	140	34	27	26	10	5	270	130	71,43	71,43
26	140	32	27	26	10	5	270	130	74,29	74,29
27	140	31	27	26	10	5	270	130	77,14	77,14
28	140	30	27	26	10	5	270	130	80,00	80,00

Tabela 3.7 – Ajuste das velocidades de avanço e de reversão

V_{eq} (cm/min)	$V_{A(Ajustada)}$ (cm/min)	$V_{R(Ajustada)}$ (cm/min)	S (mm)	t (s)				
25	74	74	100	24,10	24,09	24,10	24,10	24,10
26	77	77	100	23,10	23,11	23,11	23,10	23,10
27	80	80	100	22,23	22,22	22,23	22,23	22,22
28	83	83	100	21,46	21,47	21,46	21,47	21,47

CAPÍTULO IV

Efeito da Técnica Switchback sobre a Estrutura de Solidificação do Cordão

4.1 Metodologia adotada para avaliar o efeito da reversão sobre a estrutura de solidificação do cordão

Uma das motivações para se estudar a técnica Switchback foi saber como ela poderia afetar a estrutura de solidificação do cordão. Com a reversão, o arco elétrico pode promover a refusão de parte do metal já solidificado e/ou reaquecer regiões solidificadas. Assim, faz-se necessário o entendimento destes fenômenos (refusão e reaquecimento do cordão) devido às constantes reversões. Além disso, seria importante avaliar também o efeito da inclinação da tocha. Isto porque o posicionamento da tocha, puxando ou empurrando, é modificado de acordo com o movimento. Se a tocha avançar com a inclinação puxando, a reversão é realizada de forma empurrando (condição denominada aqui de “puxando-empurrando”). Similarmente, se a tocha avançar com a inclinação empurrando, ela recua puxando (condição “empurrando-puxando”). Sabe-se da literatura (SCOTTI e PONOMAREV, 2008) que a soldagem empurrando possibilita uma menor penetração do cordão. Assim, em uma única reversão da tocha, se o avanço for puxando o cordão apresentará uma maior penetração e, após a reversão, a penetração será menor. Então, é possível que com esta reversão não ocorra a refusão total do cordão e poderá haver algum tratamento térmico, tal como ocorre na soldagem multipasses (passe de revenido). Neste trabalho, foi utilizado um ângulo de $\pm 15^\circ$.

A avaliação do efeito da reversão e da inclinação da tocha na soldagem switchback sobre a estrutura de solidificação do cordão foi realizada em duas etapas. Na primeira, as soldagens foram realizadas em uma única reversão, a qual teve o mesmo comprimento do cordão (140 mm, padrão para toda as soldas), como indicado na Figura 4.1. A velocidade empregada na tocha (durante as fases de avanço e reversão) foi de 50 cm/min para manter

constante a velocidade equivalente de soldagem em 25 cm/min. Foi importante produzir soldas nesta condição para que fosse observado o efeito de uma única reversão. Foram soldadas duas placas de teste, um na condição puxando-empurrando e outro na empurrando-puxando (as duas soldagens foram replicadas).

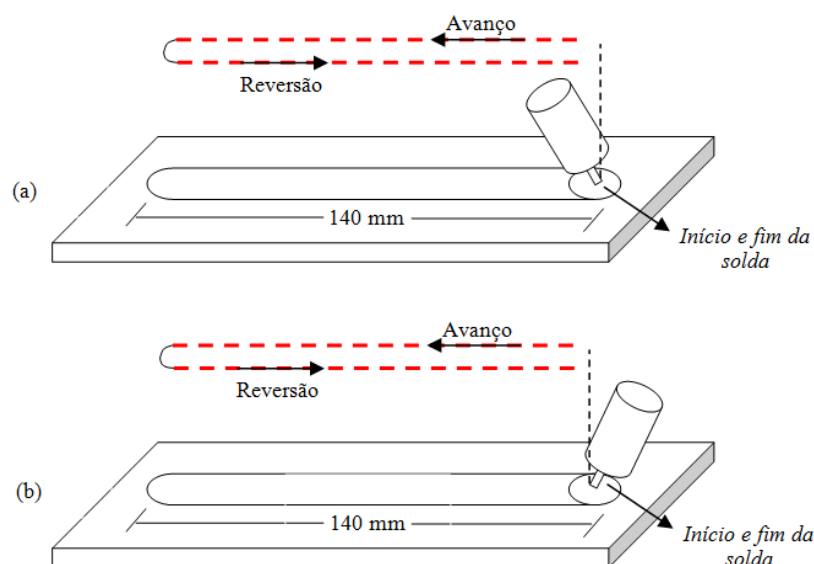


Figura 4.1 – Ilustração da soldagem MIG/MAG Pulsado com switchback com reversão única: (a) condição puxando-empurrando; e (b) condição empurrando-puxando

Na segunda etapa, vários comprimentos de reversão foram testados, como indicado na Tabela 4.1. Para cada comprimento de reversão utilizado, foi definido um comprimento de avanço para a tocha. Buscou-se realizar as soldagens com aquela inclinação da tocha mais adequada e observada nos ensaios preliminares. Após as soldagens, foi observado o aspecto de cada cordão produzido. Aqueles cordões que apresentaram uma geometria regular foram selecionados e submetidos a análise metalográfica, com a finalidade de investigar a estrutura de solidificação do metal de solda. As seções transversais e longitudinais das placas de teste (Figura 4.2) foram retiradas e embutidas a frio com resina epóxi. Em seguida, as suas superfícies foram submetidas ao processo de lixamento (180, 220, 320, 400, 600, 1200 e 2000 mesh) e polimento com alumina de granulométrica de 1 micron. Finalmente, elas foram atacadas com Nital 2% por imersão durante um tempo de 30 s. Em seguida, as amostras foram levadas até um microscópio óptico com a finalidade de procurar possíveis diferenças na estrutura de solidificação dos cordões produzidos.

Tabela 4.1 – Diferentes combinações de comprimentos de avanço e de reversão testados

Avanço (mm)	10	30	30	50	60
Reversão (mm)	5	15	20	25	50

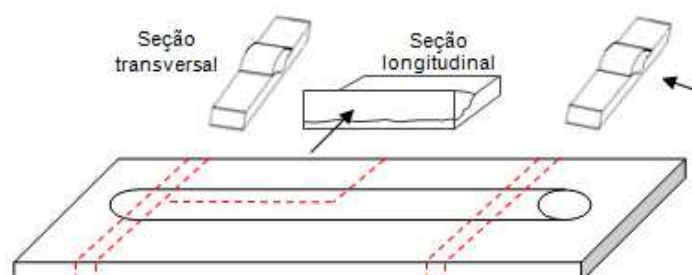


Figura 4.2 – Ilustração das regiões onde foram retiradas as amostras para análise metalográfica

4.2 Efeito da reversão

A Figura 4.3 apresenta as macrografias obtidas da seção transversal de uma solda produzida com uma única reversão da técnica switchback. Por esta figura, verifica-se que na seção A-A (início da reversão) a estrutura de solidificação apresenta-se no estado bruto de fusão, com grãos fortemente colunares. Já na seção B-B (um tempo maior entre o passe de avanço e o de reversão), verifica-se a geometria do passe de avanço fica remanescente (indicando que a penetração se deu no passo de avanço), mas percebe-se a recristalização dos grãos colunares na região do fundo do cordão, tal como ocorre em soldagens multipasses. Também se percebe que o cordão ficou menos convexo na seção A-A, mas com uma distribuição de calor que favorece uma maior ZTA (inclusive com grãos mais grosseiros, ZTA-GG). A ZTA grosseira do segundo passe na seção B-B estaria sobre a região anteriormente colunar do primeiro passe, enquanto a região de normalização do segundo passe (ZTA com grãos finos, ZTA-GF) estaria sobre a região grosseira da ZTA do primeiro passe, como detalha-se melhor na Figura 4.4. Pode-se, assim, prever que melhores propriedades seriam conseguidas com distância de retrocesso maiores, mas deve-se lembrar que em uma soldagem switchback haveria um novo passe de avanço sobre uma seção do tipo B-B. Estas características diferenciadas sugerem que na seção A-A a poça ainda estava líquida durante a reversão, ao contrário da seção B-B.

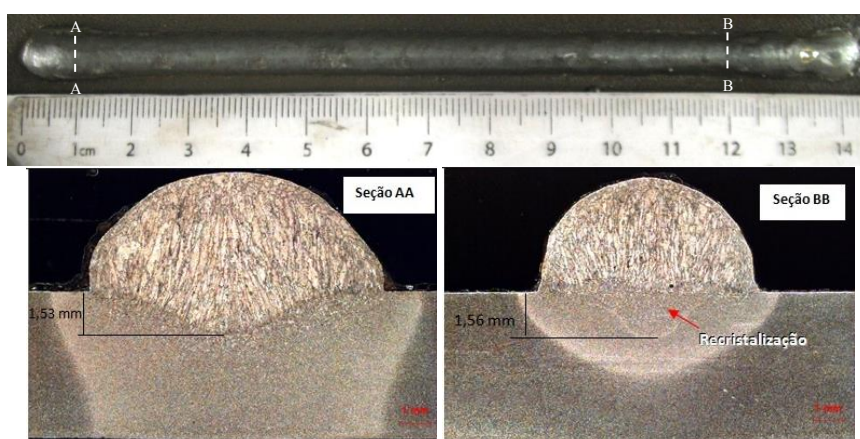


Figura 4.3 – Seções transversais em diferentes posições da soldagem *puxando-empurrando* com 140 mm de avanço e 140 mm de reversão (a seção AA está à 10 mm do ponto de reversão, enquanto a seção B-B está a 120 mm)

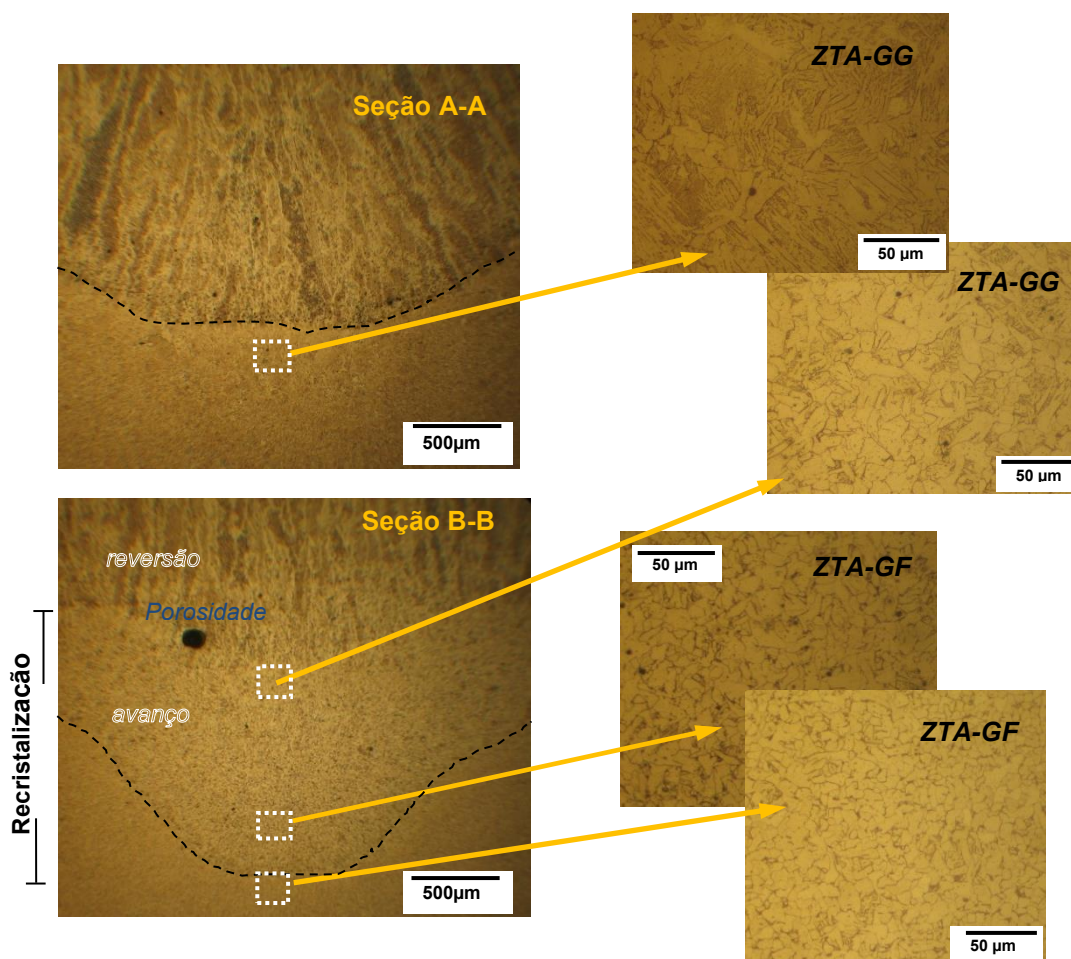


Figura 4.4 – Detalhamento das ZTAs das seções A-A e B-B indicadas na figura 4.3

Assim, na seção A-A o calor imposto seria 2 vezes o calor individual das soldagens em cada direção, ou seja, como se a tocha tivesse viajado em menor velocidade. Já na seção B-B, é tipicamente um passe sobre outro passe. A energia de soldagem de cada um desses

passes é a de cada passe individualmente. Com isto acredita-se que a recristalização e a menor ZTA nessa seção, que, como mencionado, deve ter melhores propriedades mecânicas e possivelmente menos tensões térmicas residuais (mas a análise sobre este aspecto é mais complexa e não será foco deste trabalho). A Figura 4.3 evidencia, ainda, que a região do cordão na qual foi extraída a seção A-A apresentou um maior volume de metal depositado. Isto pode estar relacionado com a inércia do robô durante a reversão, ou seja, a tocha permaneceu um tempo maior neste trecho, até alcançar a velocidade empregada, e, com isso, foi depositada uma maior quantidade de material.

Para melhor avaliar o início desta recristalização com a reversão da tocha, foi reproduzida uma réplica em outra placa de teste. Neste caso, foi analisada a seção longitudinal do cordão produzido, cuja microestruturas são mostradas na Figura 4.5. Nesta figura, é possível observar três regiões com diferentes morfologias de solidificação. Na região 1, formada antes de cerca de 10 mm do ponto de reversão, a morfologia mais para o centro do cordão é de grãos colunares, que perde um pouco esta característica devido ao aparecimento de grãos equiaxiais próximos a linha de fusão. Isto indica que mesmo logo após a reversão (aproximadamente 1,2 s depois), o comportamento não é 100% como se fosse uma poça única (fenômeno inesperado). Na segunda região, iniciada a 10 mm da reversão (a cerca de 1,2 s), a macroestrutura se apresenta com grãos colunares próximo a linha de fusão e se estende para a região central (esta estrutura de solidificação se manteve ao longo de grande comprimento da solda avaliado), indicando o comportamento ser de uma poça única. A justificativa para esta diferença entre as regiões 1 e 2 pode ser explicada da seguinte forma: na região 1, devido à reversão, é possível se ter maiores perdas de calor para a frente do cordão, ou seja, está ainda em regime transitório, ao contrário da região 2. A região 2, que foi também ilustrada pela seção A-A na Figura 4.3, se caracteriza por ser longa (aproximadamente de 25 mm para a dada energia imposta). Porém, a partir de 32 mm do ponto de reversão, ou 3,84 s da reversão, marcada como início da região 3, foi possível notar, pela seção longitudinal, uma mudança de formação macroestrutural. A estrutura de solidificação do metal de solda é caracterizada por grãos colunares mais no centro do cordão, passando para grãos recristalizados próximo à linha de fusão. Nota-se ainda na região da ZTA grosseira original um refino total dos grãos (normalização).

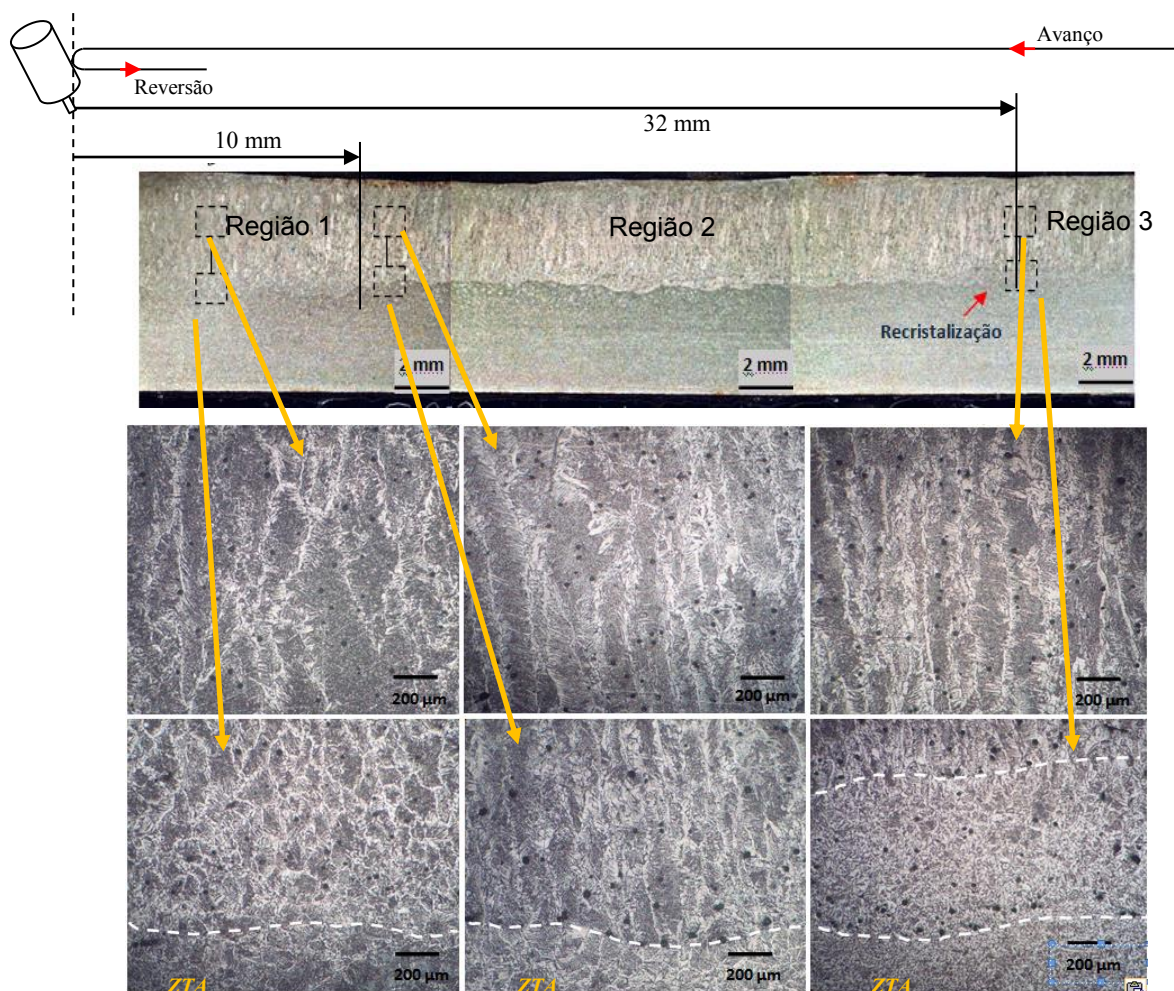


Figura 4.5 – Seção longitudinal de uma soldagem na condição *puxando-empurrando*, com 140 mm de avanço e 140 mm de reversão (na parte inferior são apresentadas ampliações das seções de cada região)

A região 3 se equivale à seção B-B da Figura 4.3. Desta forma, pode-se prever durante a reversão 3 regiões, a primeira próxima da reversão (que poderia ser chamada de região semi-recristalizada), a segunda um pouco afastada (que poderia ser chamada de região sem recristalização) e a terceira mais afastada (que poderia ser chamada de região com recristalização). Naturalmente, o comprimento e a distância entre essas regiões dependem principalmente para um dado modo operacional do processo, da corrente, velocidade de soldagem e inclinação da tocha.

4.3 Efeito da Inclinação da tocha

As soldas analisadas anteriormente foram produzidas com a inclinação da tocha “empurrando” durante a sua reversão (condição *puxando-empurrando*). Passou-se a

questionar se haveria alguma influência da inclinação da tocha. Assim, outras soldas foram produzidas, porém com a inclinação “puxando” durante a reversão, (condição empurrando-puxando), para comparar com os resultados obtidos anteriormente. A Figura 4.6 apresenta as macrografias obtidas da seção transversal de uma solda produzida nessa condição. Verifica-se nesta figura que também ocorreu a recristalização de grãos do metal de solda no fim da reversão (seção B-B), porém em uma menor área do que aquela observada na Figura 4.3. Também foi menor a ZTA e a penetração, fatos não observados em relação a seção A-A.

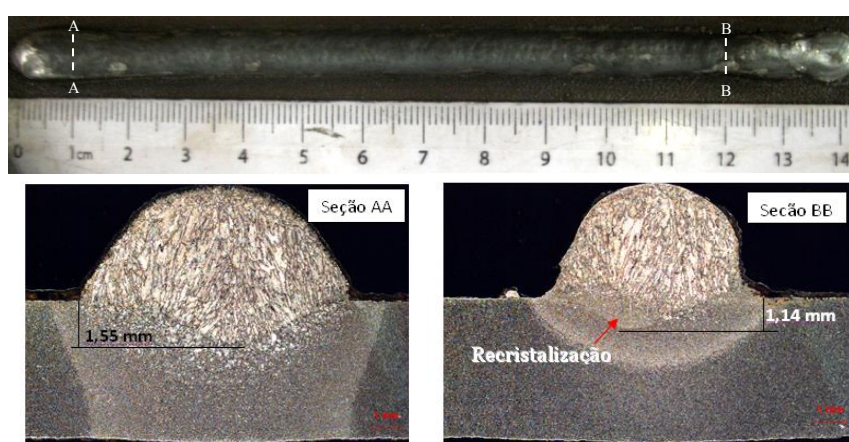


Figura 4.6 – Seções transversais em diferentes posições da soldagem *empurrando-puxando* com 140 mm de avanço e 140 mm de reversão (a seção AA está à 10 mm do ponto de reversão, enquanto a seção B-B está a 120 mm)

Já a Figura 4.7 apresenta macroestruturas de regiões de uma seção longitudinal tirada do cordão réplica da soldagem apresentada na Figura 4.6. Resultado similar àquele apresentado na Figura 4.5 foi encontrado para a estrutura de solidificação do metal de solda produzido na condição empurrando-puxando. Também foram observadas as três diferentes regiões com estrutura de solidificação, ou seja, a região semi-recristalizada, a região sem recristalização e a região com recristalização, porém menos caracterizadas (dificultando mensurar o início das mudanças macroestruturais).

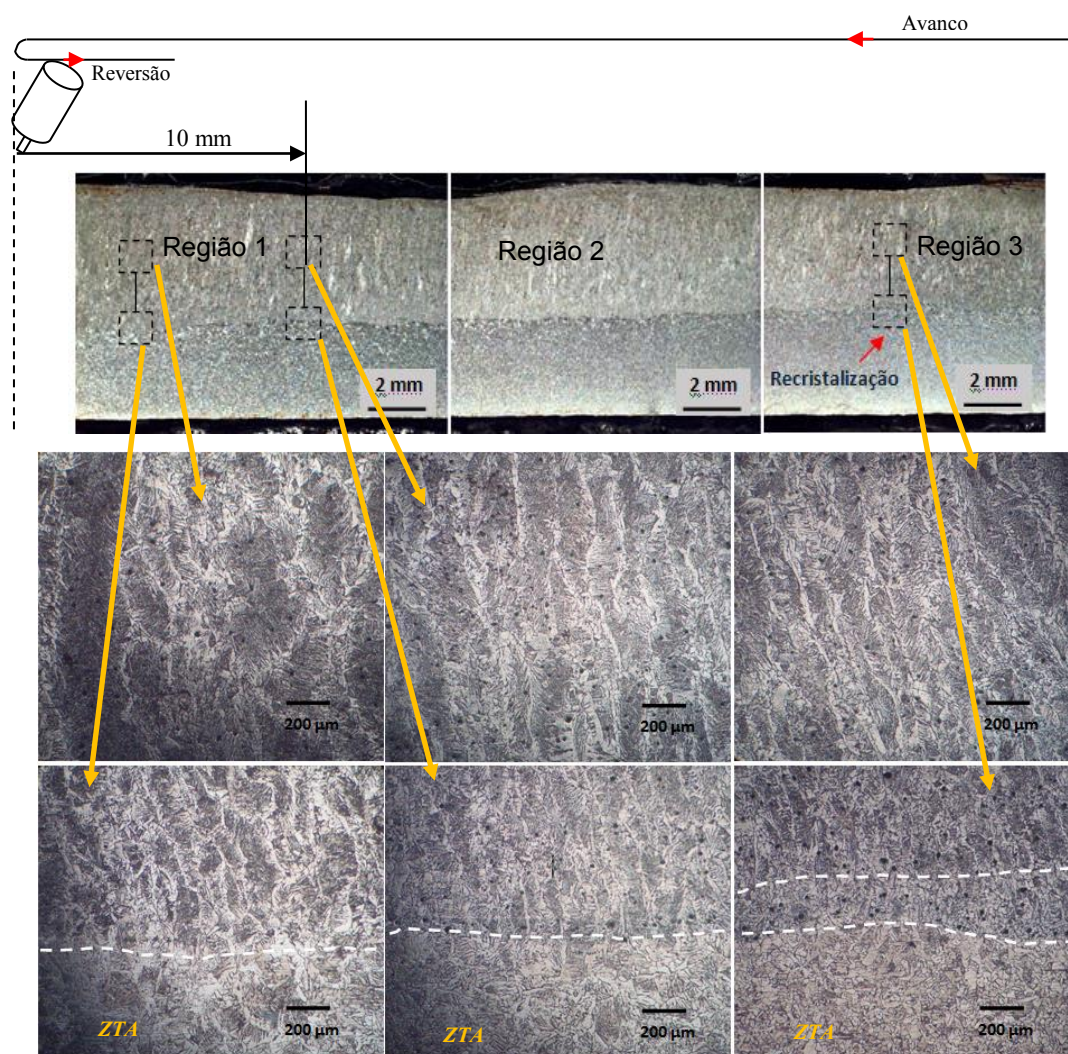


Figura 4.7 – Seção longitudinal de uma soldagem na condição *empurrando-puxando*, com 140 mm de avanço e 140 mm de reversão (na parte inferior são apresentadas ampliações das seções de cada região)

O fato da recristalização ter sido mais evidente na condição *puxando-empurrando* deve estar relacionado com o comportamento da penetração alcançada pela poça de fusão durante a soldagem. Nessa última condição, o avanço da tocha foi realizado na condição puxando, porém, quando a tocha passou para o movimento de recuo, a condição de soldagem mudou automaticamente para empurrando, uma vez que não foi alterada a angulação da tocha neste instante. Como é conhecido na literatura (SCOTTI e PONOMAREV, 2008), a soldagem puxando apresenta uma penetração maior da poça de fusão do que a soldagem empurrando. Assim, quando a tocha avançou, a penetração da solda foi maior do que quando recuou e este passe de recuo, com menor penetração, não refundiu completamente o passe anterior, deixando uma maior área favorável para recristalizar os grãos.

A ilustração proposta na Figura 4.8 ajuda a compreender esta explicação. Estes resultados apontam que a inclinação da tocha deve ser levada em conta durante a soldagem com a técnica switchback. Para que a reversão tenha um efeito notável sobre a estrutura de solidificação do cordão, o ideal é que a mesma seja realizada com a inclinação da tocha “empurrando” (condição puxando-empurrando), pois, desta maneira, haverá uma maior área para a recristalização de grão do metal de solda.

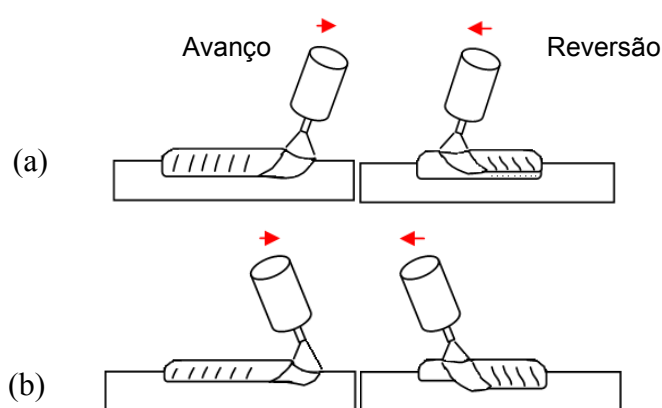


Figura 4.8 – Ilustração do efeito do ângulo da tocha sobre a estrutura de solidificação na soldagem com switchback: (a) Puxando-empurrando; (b) Empurrando-puxando

4.4 Efeito da variação do comprimento da reversão






A partir da definição da inclinação mais adequada da tocha a ser utilizada durante a reversão, buscou-se variar o seu comprimento com a finalidade de produzir cordões com boa geometria e com estrutura de solidificação satisfatória. Assim, foram realizadas soldagens com múltiplas reversões de comprimentos limitados, até atingir um comprimento total de cordão de 140 mm. Os comprimentos da reversão estudados foram de 5 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm e 50 mm. Pelos resultados obtidos anteriormente, todas as soldagens deveriam ser produzidas na condição puxando-empurrando. Entretanto, na soldagem com múltiplas reversões, o recuo da tocha é seguido de um avanço. Assim, as soldagens nesta etapa foram realizadas com a inclinação da tocha na condição empurrando-puxando. Soldagens sem reversão também foram realizadas para efeito de comparação. As condições operacionais estudadas da técnica switchback durante esta etapa são apresentadas na Tabela 4.2. Os aspectos dos cordões produzidos são ilustrados na Tabela 4.3. Nota-se na Tabela 4.3 que, para um comprimento da reversão igual a metade do comprimento do avanço, o aumento da reversão resultou em uma maior variação da geometria do cordão. Isto pode ser entendido por intermédio da ilustração apresentada na

Figura 4.9. Nos pontos de reversão da tocha, existe um acúmulo de material fundido que solidifica rapidamente tão logo a tocha se afasta. Isto acontece em função da tocha permanecer um maior tempo nesta região devido a inércia do robô. Em algumas reversões, o arco elétrico passa mais de uma vez sobre um ponto, e ele é refundido (refusão dos pontos 1 e 3). Em outras, o arco passa somente uma vez e, assim, ele permanece para compor o cordão (solidificação dos pontos 2 e 4).

Tabela 4.2 – Condições operacionais da técnica switchback avaliadas com velocidades equivalentes de 25 cm/min

Comprimento		Velocidade da tocha	
Avanço [mm]	Reversão [mm]	Avanço [cm/min]	Reversão [cm/min]
10	5	74	74
30	15	65	65
30	20	111	111
50	25	66	66
60	50	200	200

Tabela 4.3 – Aspecto dos cordões produzidos com diferentes comprimentos de reversão

	Aspecto superficial	Avanço (mm)	Reversão (mm)
Comprimento da reversão = a metade do comprimento do avanço		10	5
		30	15
		50	25
Comp. Da reversão > que a metade do comprimento do avanço		30	20
		60	50

Quando a soldagem é realizada com grande comprimento de reversão, estes pontos com maior volume de material solidificado ficam afastados e torna-se perceptível a variação na geometria do cordão. Quando ela é realizada com pequeno comprimento de reversão, estes pontos ficam próximos e pouco perceptível é a variação na geometria do cordão. Esta maior variação da geometria do cordão com o aumento do comprimento da reversão pode ser reduzida se o comprimento de reversão for maior que a metade do comprimento de avanço. A solda produzida com 20 mm, teve um comprimento de reversão maior que a metade do avanço (15 mm) e apresentou uma menor variação da geometria. Isto ocorreu porque os pontos ficaram mais próximos, como indicado na Figura 4.10.

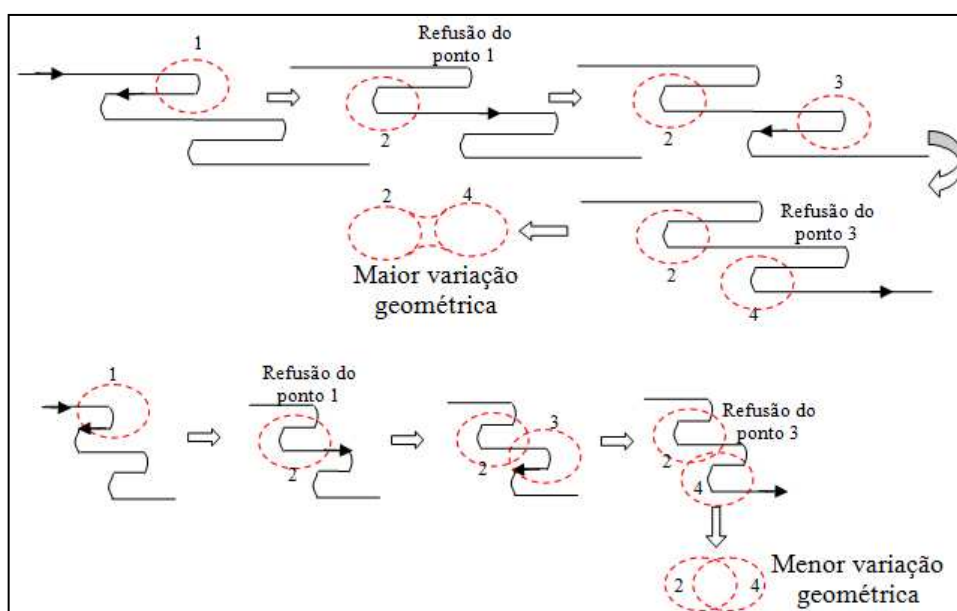


Figura 4.9 – Ilustração do efeito do comprimento da reversão na geometria do cordão com reversão igual à metade do avanço

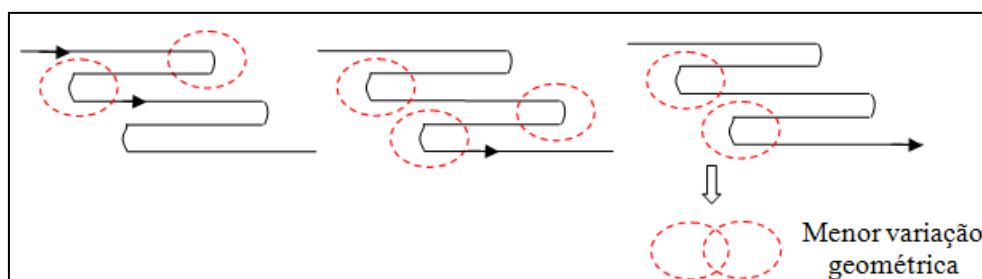


Figura 4.10 – Ilustração do efeito do comprimento da reversão na geometria do cordão com reversão superior a metade do avanço

Finalmente, a maior reversão de 50 mm também proporcionou uma grande variação da geometria, mesmo com o comprimento bem superior à metade daquele utilizado no

avanço (maior que 30 mm). Além disso, nesta condição de reversão, foi observada a presença de concavidades no reforço, indicando a falta de material durante a solidificação do cordão. Isto ocorre quando o arco elétrico é retirado rapidamente da poça de fusão. No caso desta soldagem, o emprego da velocidade de soldagem de 200 cm/min certamente foi o motivo para a formação destas concavidades. Estes resultados mostram que existe um limite para o comprimento da reversão, para que se alcance um cordão com geometria regular. Como as soldas realizadas com reversões de 5 mm e 20 mm apresentaram uma geometria mais uniforme, somente elas foram escolhidas para análise. As estruturas de solidificação obtidas na seção longitudinal desses cordões são apresentadas nas Figuras 4.11 e 4.12, respectivamente. Analisando estas figuras, percebe-se, nitidamente, a presença de grãos equiaxiais próximos à linha de fusão, sendo que estes grãos foram mais finos para a reversão de 20 mm. Deve ser ressaltado que a estrutura observada com 5 mm de reversão (Figura 4.11) foi similar àquela obtida para a região 1 da Figura 4.5, enquanto que a observada com 20 mm de reversão (Figura 4.12) foi parecida com aquela encontrada na região 3 da mesma figura. Observa-se ainda na Figura 4.12 a mudança na orientação dos grãos do metal de solda com as reversões.

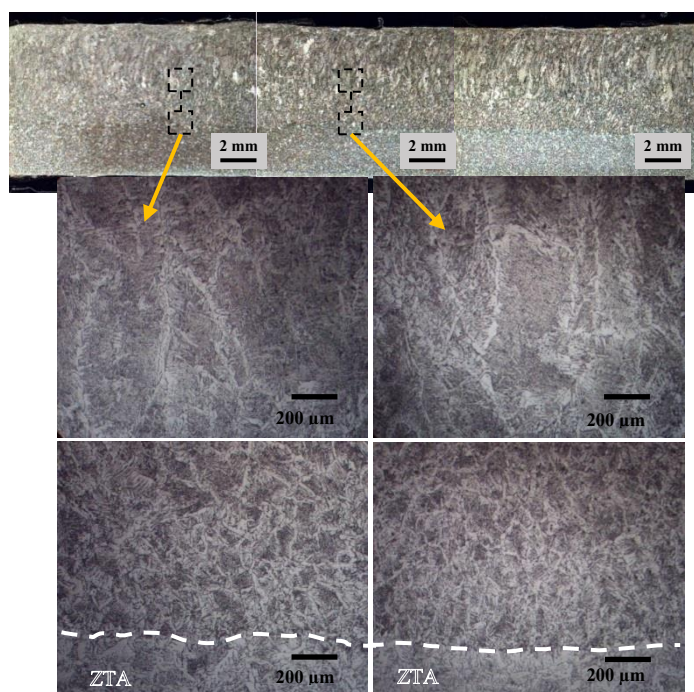


Figura 4.11 – Estrutura de solidificação do metal de solda com avanço de 10 mm e reversão de 5 mm (percebe-se grãos equiaxiais próximo à linha de fusão)

Essa mudança fica melhor de ser visualizada a partir das linhas tracejadas. Isto pode ter ocorrido ainda durante a fase de solidificação do cordão, em função da alteração de direção

da frente de solidificação. A mudança na orientação dos grãos também foi verificada no metal de solda produzido com 5 mm de reversão, porém de forma menos evidente. Já a solda produzida sem o emprego da técnica apresentou uma estrutura de solidificação completamente colunar, como pode ser observado na Figura 4.13. Isto mostra que a técnica switchback pode, de alguma forma, modificar a estrutura de solidificação do cordão próximo à linha de fusão.

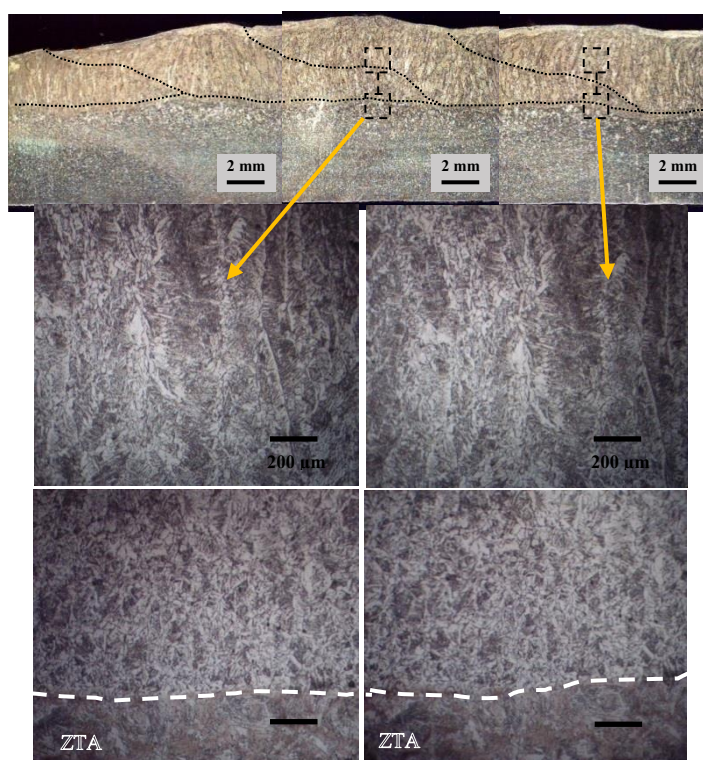


Figura 4.12 – Estrutura de solidificação do metal de solda com avanço de 30 mm e reversão de 20 mm (percebe-se grãos equiaxiais, mais finos que na figura 4.11) próximo à linha de fusão

Em função do pequeno comprimento de 5 mm durante a reversão, passou-se a questionar se a formação dos grãos equiaxiais, nesta condição, teria ocorrido durante a solidificação do metal líquido e não devido à algum tratamento térmico. Isto porque, talvez, não tivesse ocorrido tempo suficiente para a poça de fusão solidificar antes de ocorrer a reversão. Alguns mecanismos (KOU, 2003) explicam a formação destes grãos durante a solidificação do cordão. Dentre eles, podemos citar; o destacamento de grãos da zona parcialmente fundida que são levados para a poça líquida, fragmentação dendrítica da frente de solidificação, nucleação heterogênea e superresfriamento constitucional. Entretanto, estes mecanismos não explicam a formação de grãos equiaxiais próximo à linha de fusão, como o observado. Geralmente, verifica-se a formação desta estrutura equiaxial no centro

do cordão. Então, como a estrutura equiaxial foi verificada apenas próximo à linha de fusão, volta-se a acreditar na ideia de estar ocorrendo algum tratamento térmico.

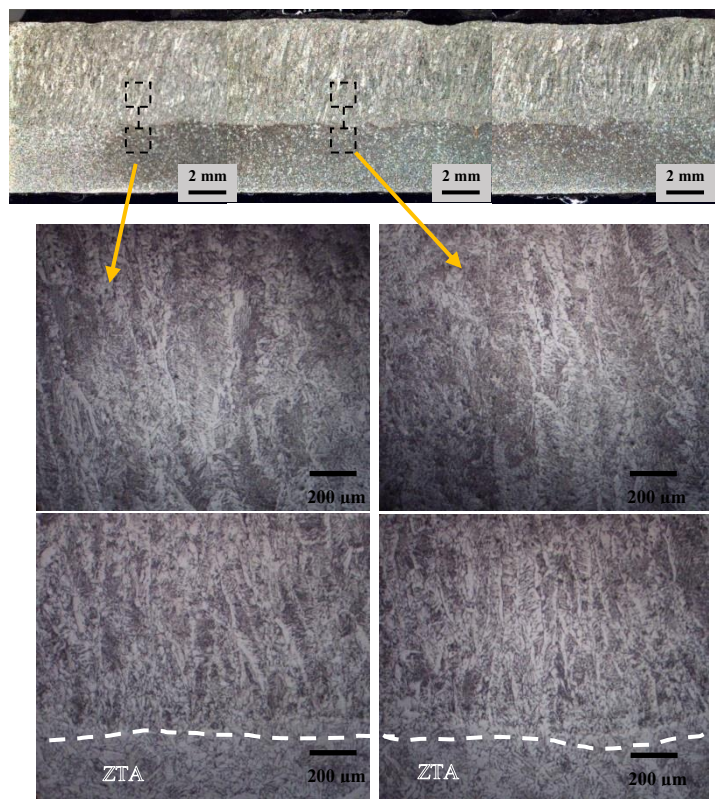


Figura 4.13 – Estrutura de solidificação do metal de solda sem o emprego da técnica (percebe-se grãos colunares próximo à linha de fusão)

Desta forma, pode ser que antes de ocorrer o avanço da tocha, apenas o fundo do cordão já havia solidificado e foi tratado termicamente logo em seguida, como indicado na ilustração da figura 4.14. Novamente, assim como ilustrado na figura 4.8, a inclinação da tocha pode estar favorecendo para a solidificação no fundo do cordão. Como o avanço é realizado empurrando, a poça de fusão tem menor penetração e não interrompe o processo de solidificação no fundo do cordão, iniciado na reversão. Mas o seu calor reaquece esta região, promovendo o tratamento térmico. O mesmo entendimento podemos ter com relação à soldagem com 20 mm de comprimento da reversão.

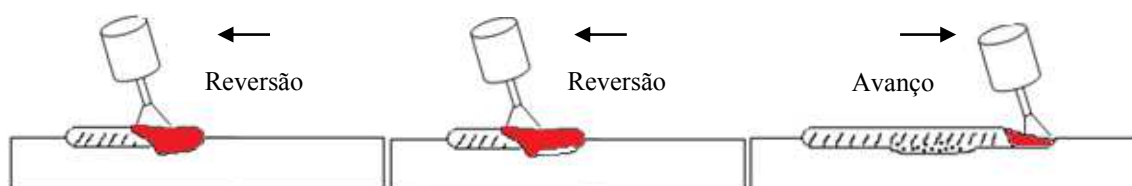


Figura 4.14 – Ilustração do efeito do ângulo da tocha sobre a estrutura de solidificação na soldagem Switchback com múltiplas reversões (empurrando-puxando)

Isto confirma mais uma vez que a técnica Switchback deve ser empregada com a utilização correta da inclinação da tocha. Para o caso das soldagens com múltiplas reversões, para que seja verificado algum tratamento térmico no fundo do cordão, a reversão tem que ser realizada com a inclinação da tocha “puxando”. A Figura 4.15, apresenta uma solda produzida pela técnica com reversão de 5 mm de comprimento, porém com a inclinação da tocha “empurrando” durante a reversão. Percebe-se que a inclinação incorreta da tocha não possibilitou a ocorrência de recristalização no fundo do cordão, onde foi obtida uma estrutura bruta de fusão com grãos fortemente colunares.

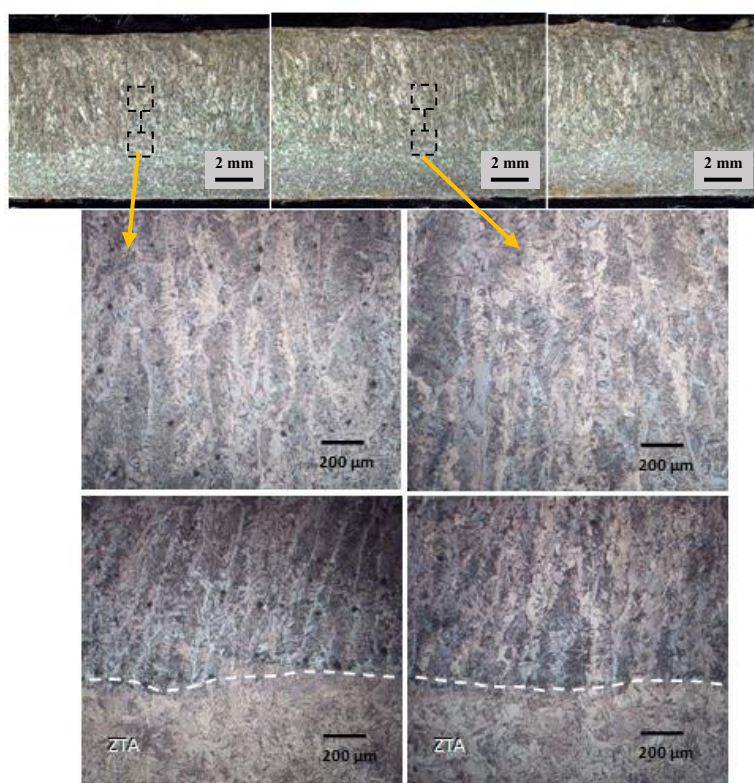


Figura 4.15 – Estrutura de solidificação do metal de solda com avanço de 10 mm e reversão de 5 mm (percebe-se grãos colunares próximo à linha de fusão)

4.5 Correlação dos resultados encontrados com a temperatura sob o cordão

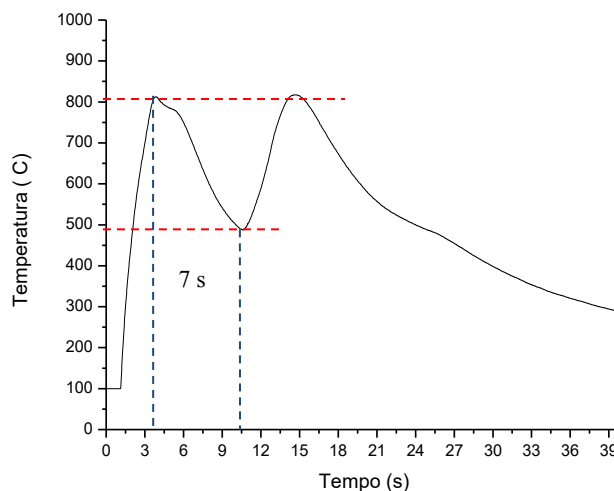
Buscou-se encontrar alguma relação dos resultados obtidos para a estrutura de solidificação do cordão com a temperatura. Novos testes foram propostos para tentar compreender o fenômeno da recristalização. Desta vez, foi utilizada uma câmera termográfica, a qual foi posicionada sempre sob a placa de teste, como o observado na Figura 3.2 do Capítulo 3.

4.5.1 Influência da Temperatura na recristalização do cordão

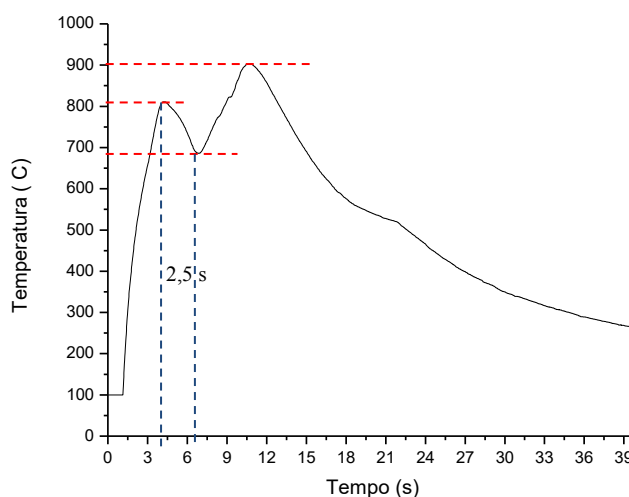
Foi observado na soldagem com uma única reversão uma estrutura com grãos recristalizados no fundo do cordão (região 3 da Figura 4.5). Esta estrutura surgiu a partir de 32 mm do início da reversão, após um tempo de esfriamento do cordão de 7,2 s. Este foi o tempo que levou a tocha para sair deste ponto, no avanço, e retornar para este mesmo local, na reversão. Também, foi observado uma estrutura similar na solda produzida com 20 mm de reversão (Figura 4.12). Entretanto, apesar de não se saber o real valor do tempo de esfriamento nesta condição da técnica, acredita-se que foi muito inferior, em função do pequeno comprimento da reversão.

Então, diante destes resultados, passou-se a questionar como duas estruturas muito parecidas poderiam se formar em tempos tão distantes. Isto provavelmente estaria relacionado com a temperatura e, desse modo, propôs-se um experimento para analisar o seu comportamento em diferentes tempos de esfriamento do cordão. Para esta análise, pontos de solda a uma corrente de 150 A e em corrente pulsada (mesmas condições operacionais apresentadas na Tabela 4.1 do Capítulo 4) foram produzidos sobre uma placa de teste de um aço baixo carbono com 4,7 mm de espessura. Na realização de cada ponto, o arco elétrico foi inicialmente aberto e mantido por um tempo aproximado de 3 s. Em seguida, o arco foi extinto durante um certo tempo para ser logo em seguida reaberto e mantido por 3 s. O tempo de extinção do arco (tempo de esfriamento da poça de fusão) foi variado em quatro diferentes valores: 7,0 s; 5,0 s; 2,5 s e 1,5 s.

O comportamento da temperatura em função do tempo de esfriamento pode ser visualizado por intermédio da Figura 4.16. A aquisição da temperatura foi realizada sob as placas de teste por intermédio de uma câmera termográfica. Pode ser observado que, com um maior tempo para o esfriamento da poça de fusão (7 s), a temperatura reduziu até 490 °C e atingiu um máximo de 810 °C, após o reaquecimento (o mesmo valor obtido anteriormente, no primeiro aquecimento). Já quando a poça teve pouco tempo para esfriar (2,5 s), a temperatura abaixou pouco, no caso até 690 °C, o que favoreceu, em seguida, que alcançasse um valor máximo maior e igual a 900 °C. Vale ressaltar que as temperaturas observadas com a câmera termográfica durante os experimentos foram obtidas sob a superfície das placas de teste. Isto significa que as temperaturas atingidas próximo ao fundo do cordão são certamente maiores do que as medidas, mas isto não invalida a discussão acima, pois não foi objetivo deste capítulo conhecer o real valor da temperatura no fundo do cordão.



(a)



(b)

Figura 4.16 – Comportamento da temperatura em função do tempo de esfriamento entre os dois ciclos de soldagem sobre uma mesma poça: (a) 7s; e (b) 2,5s

As Figuras 4.17 e 4.18 mostram, respectivamente, os aspectos dos pontos produzidos e as macroestruturas de solidificação observadas na seção longitudinal de cada ponto de solda. Nota-se, através destas figuras, a mudança progressiva na sua geometria. Com a redução do tempo de extinção do arco (tempo de esfriamento), a largura tendeu a aumentar e o reforço diminuir. Isto ocorreu em função da diferença de temperatura entre os pontos antes de serem reaquescidos com a posterior reignição do arco. Quando o tempo de esfriamento foi de 7 s, o metal depositado nos primeiros 3 s de arco aberto teve tempo suficiente para esfriar, abaixando a sua temperatura. Isto fez com que a molhabilidade da poça de fusão diminuísse (menor largura) após a reabertura do arco. No caso de 1,5 s de esfriamento, o metal depositado nos primeiros 3 s teve menos tempo para esfriar e,

portanto, a chapa certamente estava a uma temperatura maior, aumentando a molhabilidade da poça (maior largura).



Figura 4.17 - Pontos de solda produzidos por duplo ciclos de 3 s a 150 A, da esquerda para a direita, com 7 s; 5 s; 2,5 s e 1,5 s de interrupção do arco

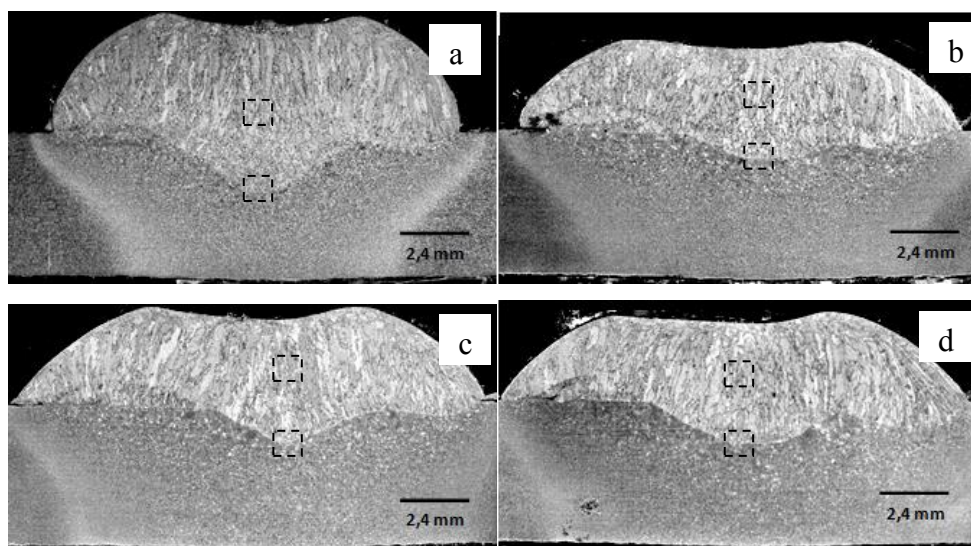


Figura 4.18 - Macroestrutura de solidificação obtida nos pontos de solda por duplo ciclos de 3 s a 150 A produzidos a diferentes tempos de interrupção do arco: (a) 7 s; (b) 5 s; (c) 2,5 s e (d) 1,5 s

Na Figura 4.18, observa-se ainda que, no geral, a estrutura de solidificação da zona fundida, obtida em cada condição de esfriamento, foi colunar. Entretanto, percebe-se que nos casos de 5 s (Figura 4.18 (a)) e 7 s (Figura 4.18 (b)) a estrutura de solidificação tendeu a ser pouco colunar próximo à linha de fusão, sendo mais perceptível no primeiro caso. Isto pode ser melhor observado por intermédio da Figura 4.19, a qual apresenta as microestruturas obtidas nas regiões demarcadas da Figura 4.18. Nessa figura, observa-se que existe uma mudança progressiva da estrutura de solidificação do cordão, próximo à linha de fusão, com a redução do tempo de esfriamento. A recristalização é observada em todas as condições de tempo, sendo que com 1,5 s a recristalização foi pouco evidente, se confundindo com uma estrutura bruta de fusão com grãos colunares. Este resultado mostra que mesmo em um curto intervalo de tempo de 1,5 s, o fundo do cordão já pode ter

solidificado, pois foi possível encontrar alguma recristalização. Isto reforça a ideia apresentada na figura 4.14. Para um tempo igual à 7 s foi observada uma estrutura recristalizada similar àquelas observadas na região 3 da figura 4.5 e na figura 4.12. A partir de 5 s, foi obtida uma estrutura semi-recristalizada, como aquelas observadas na região 1 da figura 4.5 e na figura 4.11. Com um tempo de 2,5 s, esta estrutura semi-recristalizada continuou surgindo. Finalmente, para um tempo de 1,5 s, a estrutura semi-recristalizada ainda foi observada, porém de forma menos pronunciada.

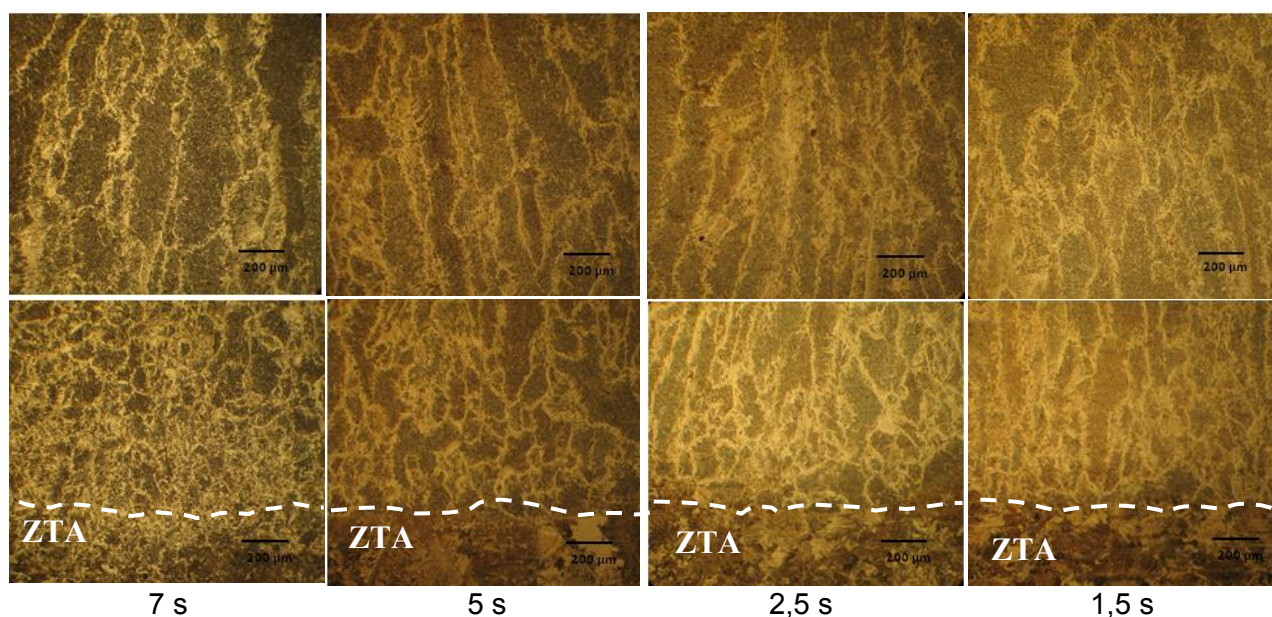


Figura 4.19 - Microestruturas obtidas nas regiões demarcadas da Figura 4.18, para diferentes tempos de esfriamento dos pontos de solda

Os resultados indicam que as estruturas recristalizadas observadas na região 3 da figura 4.5 e na figura 4.12 podem ter sido submetidas ao mesmo nível de temperatura de 810°C , mesmo com diferentes tempos de esfriamento do cordão. Isso pode ser possível em função da velocidade de soldagem empregada em cada situação. No primeiro caso, a velocidade da tocha foi de 50 cm/min durante a reversão. Nesta situação, foi necessário um tempo de 7,2 s para fazer o metal de solda esfriar até uma temperatura próxima de 490°C , antes de ser reaquecido. No segundo caso, a velocidade empregada na tocha foi muito maior e igual a 111 cm/min. Com isso, o metal solidificado no fundo do cordão esfriou muito rapidamente e alcançou esta mesma temperatura em pouco tempo. No caso das estruturas semi-recristalizadas observadas na região 1 da Figura 4.5 e na Figura 4.11, elas podem ter sido aquecidas a temperaturas próximas de 900°C . Nestes dois casos, não houve tempo para o metal esfriar até a temperatura de 490°C , mesmo com a velocidade de 74 cm/min empregada na soldagem da Figura 4.11.

4.5.2 – Análise da alteração da energia imposta no início da reversão

Experimentos anteriores realizados com uma única reversão, mostraram que no trecho aproximado de 20 mm após o início da reversão da tocha, o cordão apresenta uma geometria diferente do restante da solda (vide Figuras 4.3 e 4.6). Acredita-se que isso esteja ligado com a inércia do robô, ou seja, a velocidade de soldagem não permanece constante neste trecho e, com isso, pode estar interferindo na formação dos grãos equiaxiais próximo à linha de fusão obtidos na região 1 da Figura 4.5, em função da mudança na energia imposta. Por isso, procurou-se fazer uma abordagem sobre a inércia do robô e seus efeitos na soldagem Switchback com uma única reversão.

a) Verificação da variação da velocidade da tocha

Para mensurar a variação da velocidade da tocha durante a reversão, foi calculada a aceleração a cada 20 mm do seu início, até completar um comprimento de 100 mm. Os tempos de percurso da tocha em cada trecho foram adquiridos através de sensores magnéticos adaptados a um cronômetro digital. A velocidade empregada na tocha foi de 50 cm/min, tanto no avanço quanto no recuo. A Tabela 4.4 apresenta os valores obtidos para a aceleração da tocha. Verifica-se nesta tabela que o trecho referente aos 20 mm de recuo da tocha foi aquele que obteve a maior aceleração. A tocha partiu de uma velocidade zero no ponto inicial da reversão e alcançou uma velocidade de 43,72 cm/min em 2,75 s. A partir de 40 mm da reversão, a velocidade da tocha praticamente manteve-se constante em 50 cm/min.

Tabela 4.4 – Valores obtidos para a aceleração da tocha, nos trechos indicados, a partir de uma reversão com 100 mm de comprimento

Trecho do cordão	S (mm)	S ₀ (mm)	V (cm/min)	V ₀ (cm/min)	t (s)	a (cm/s ²)
0-20 mm	20	0	43,72	0,00	2,75	0,53
20-40 mm	40	20	49,86	43,72	2,41	0,08
40-60 mm	60	40	49,93	49,86	2,40	0,00
68-80 mm	80	60	50,42	49,93	2,38	0,01
80-100 mm	100	80	49,62	50,42	2,40	-0,01

S=posição final; S₀= posição inicial; V=velocidade final; V₀= velocidade inicial; t=tempo; a=aceleração

A Figura 4.20 evidencia que em função deste maior tempo que a tocha levou para percorrer este trecho a solda apresentou um maior volume de metal depositado, ou seja, esta variação na geometria do cordão está ligada com a inércia do robô.

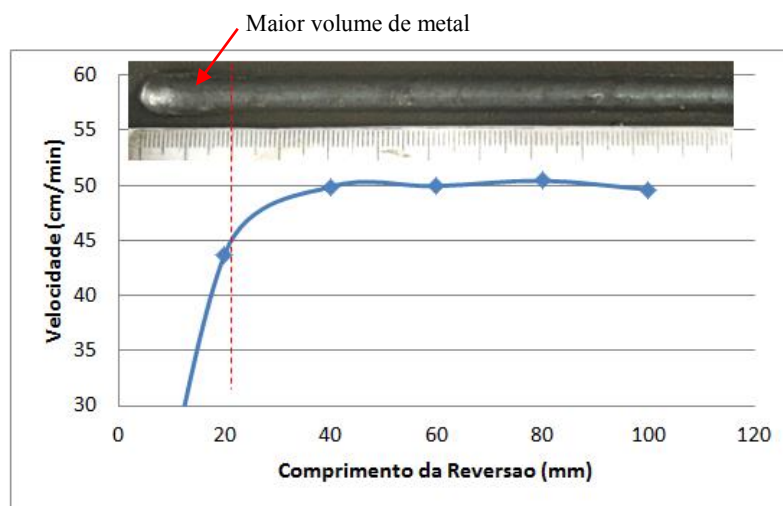


Figura 4.20 – Velocidade da tocha em função da posição durante a reversão (maior deposição de material nos primeiros 20 mm da reversão devido à inércia do robô)

b) Implicações da variação da velocidade sobre a estrutura de solidificação

Como a velocidade no primeiro trecho é diferente da velocidade empregada na tocha (50 cm/min), isto acaba dificultando a análise sobre a estrutura de solidificação. Por isso, para tentar aproximar a velocidade da tocha de 50 cm/min, realizou-se uma soldagem com 56 cm/min (condição de baixa energia imposta) nos primeiros 20 mm da reversão. Foi acrescentado 6 cm/min em função de ter sido esta, aproximadamente, a diferença encontrada entre a velocidade empregada na tocha (50 cm/min) e a obtida em 20 mm (cerca de 44 cm/min). Desta maneira, como a velocidade da tocha tenderia a se aproximar de 50 cm/min, a região 1 poderia não ser visualizada. Em seguida, para confirmar se o emprego de baixa velocidade no trecho de 20 mm realmente afetava a estrutura de solidificação, outra solda foi produzida, agora com 44 cm/min (condição de alta energia imposta). Neste caso, a velocidade de soldagem estaria bem menor no referido trecho, em função da inércia do robô, e este teste serviria para confirmar, novamente, a presença da região semi-recristalizada.

As aparências destes dois cordões estão apresentadas na Figura 4.21. Pode ser observada, novamente, a maior deposição de material no trecho de 20 mm iniciais após a reversão, em função da variação da velocidade. As Figuras 4.22 e 4.23 apresentam as estruturas de solidificação obtidas na seção longitudinal, até 30 mm da reversão, dos cordões produzidos com, respectivamente, 56 cm/min e 44 cm/min.

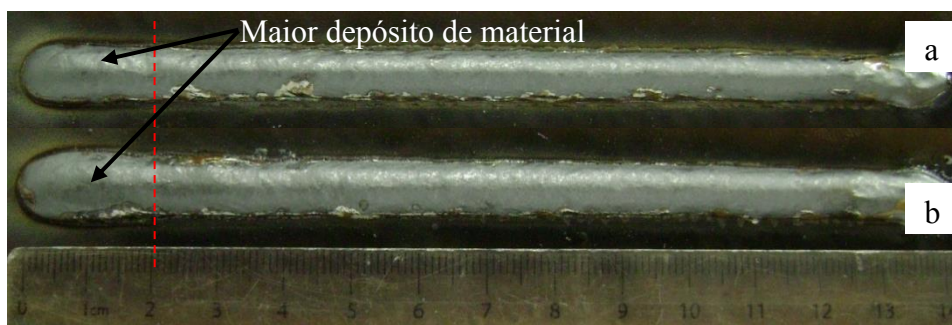


Figura 4.21 – Aspecto das soldagens produzidas com uma única reversão da técnica Switchback: (a) velocidade de soldagem de 56 cm/min (menor energia imposta); (b) velocidade de soldagem de 44 cm/min (maior energia imposta)

Por intermédio da Figura 4.22, percebe-se que a estrutura de solidificação do cordão, no trecho de 20 mm, apresentou-se predominantemente colunar. Este resultado foi diferente daquele quando se utilizou uma velocidade de soldagem de 50 cm/min durante a reversão. Neste caso, em um trecho até 11 mm do início da reversão, foi obtida uma estrutura com grãos equiaxiais próximo à linha de fusão e, daí em diante, a estrutura mudou para colunar. O resultado encontrado para a soldagem com 56 cm/min mostra que com uma maior velocidade no trecho de 20 mm da reversão (cerca de 50 cm/min) a estrutura encontrada foi colunar. Isto mostra que uma velocidade de soldagem menor do que 50 cm/min no referido trecho está afetando diretamente na formação dos grãos equiaxiais. A partir de aproximadamente 28 mm do início da reversão, esta estrutura colunar deixou de ser observada próximo à linha de fusão. No seu lugar, foi verificada uma estrutura com grãos recristalizados.

Já pela Figura 4.23, observa-se que a estrutura de solidificação do metal de solda produzido com 44 cm/min não tem mais a característica marcante de colunar, no trecho de 20 mm, como no caso anterior. No seu lugar foi obtida uma estrutura semi-recristalizada. Este resultado confirma a ideia de que ao se utilizar uma velocidade de soldagem menor do que 50 cm/min durante a reversão, isto afetou a estrutura de solidificação do cordão.

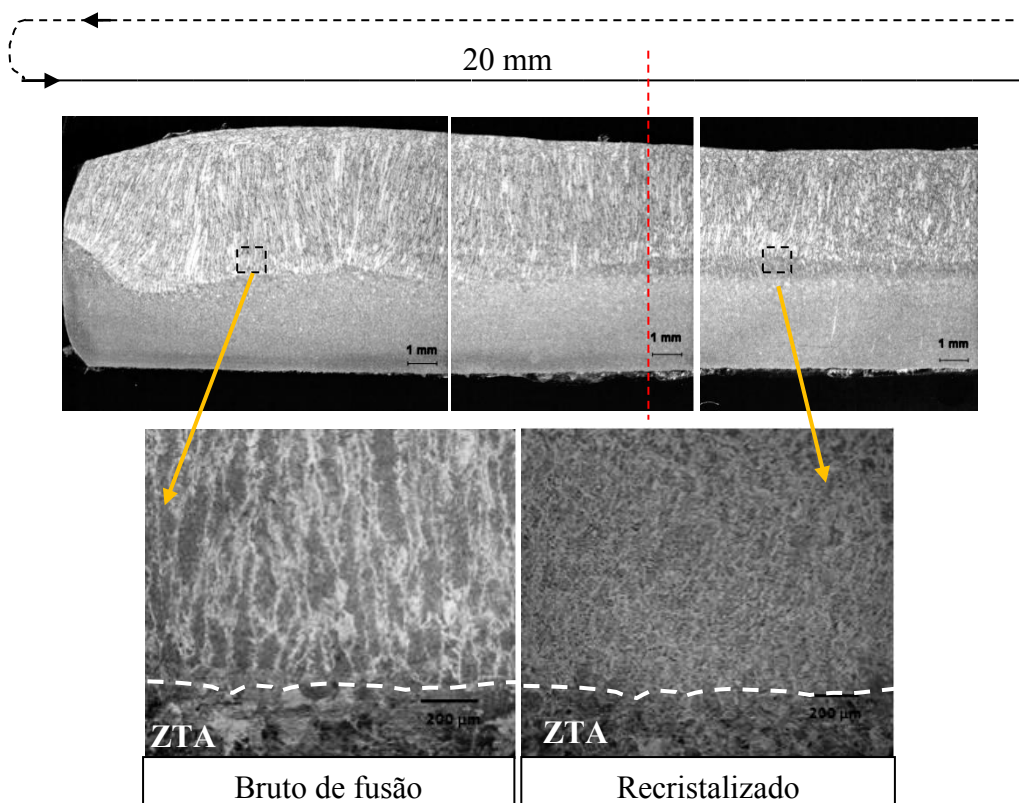


Figura 4.22 – Estrutura de solidificação do cordão no trecho de 20 mm (velocidade menor do que 56 cm/min) e logo após 20 mm da reversão (velocidade de 56 cm/min)

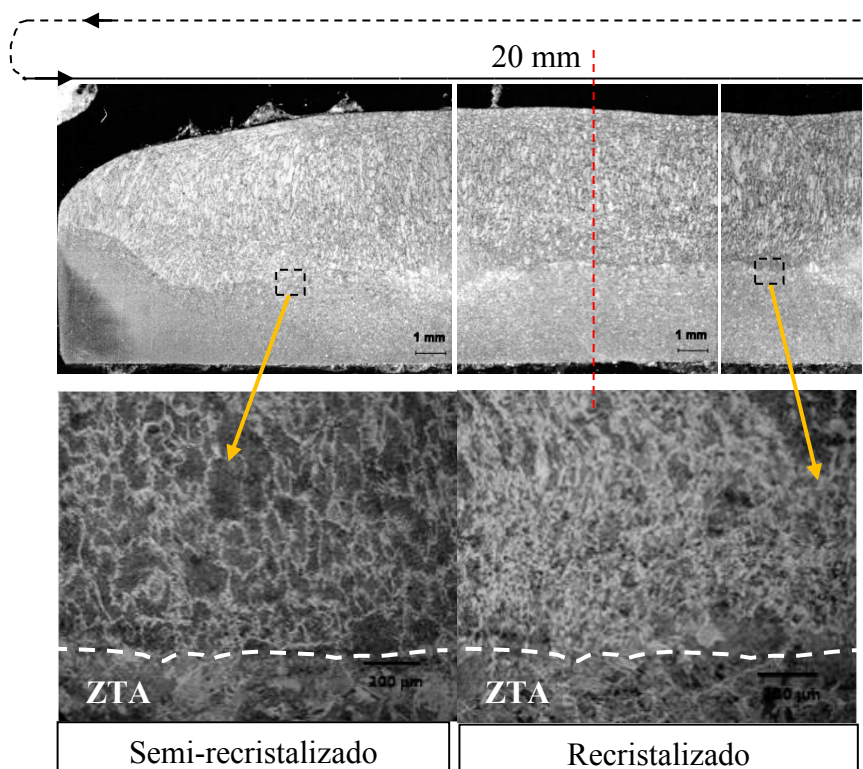


Figura 4.23 – Estrutura de solidificação do cordão obtida no trecho de 20 mm (velocidade menor do que 44 cm/min) e logo após 20 mm da reversão (velocidade igual a 44 cm/min)

c) **Análise da temperatura dentro e fora do trecho de 20 mm**

Tais observações encontradas para a estrutura de solidificação do cordão, dentro do trecho de 20 mm, está relacionada com a energia imposta utilizada durante a soldagem. Para a condição de baixa energia imposta (para a velocidade de soldagem de 56 cm/min) a estrutura observada foi totalmente colunar. Por outro lado, na condição de alta energia imposta (para a velocidade de 44 cm/min) a estrutura observada foi equiaxial próximo à linha de fusão. A utilização de diferentes níveis de energia imposta durante a soldagem implica na obtenção de diferentes valores para a temperatura máxima alcançada na poça de fusão, bem como, de diferentes valores para os tempos de esfriamento do cordão. Por isso, daqui em diante passou-se a investigar a variação de temperatura obtida nestas soldagens.

A Figura 4.24 apresenta os perfis de temperatura sob a placa de teste soldada com velocidade de 44 cm/min em diferentes pontos da reversão e a Tabela 4.5 apresenta os valores de temperatura e tempo de esfriamento em cada ponto analisado. Nota-se que, na etapa de avanço da tocha, os pontos 1 (fora da reversão), 2 (à 10 mm do início da reversão) e 3 (à 60 mm do início da reversão) foram aquecidos e atingiram temperaturas máximas de, respectivamente, 412°C, 754°C e 771°C.

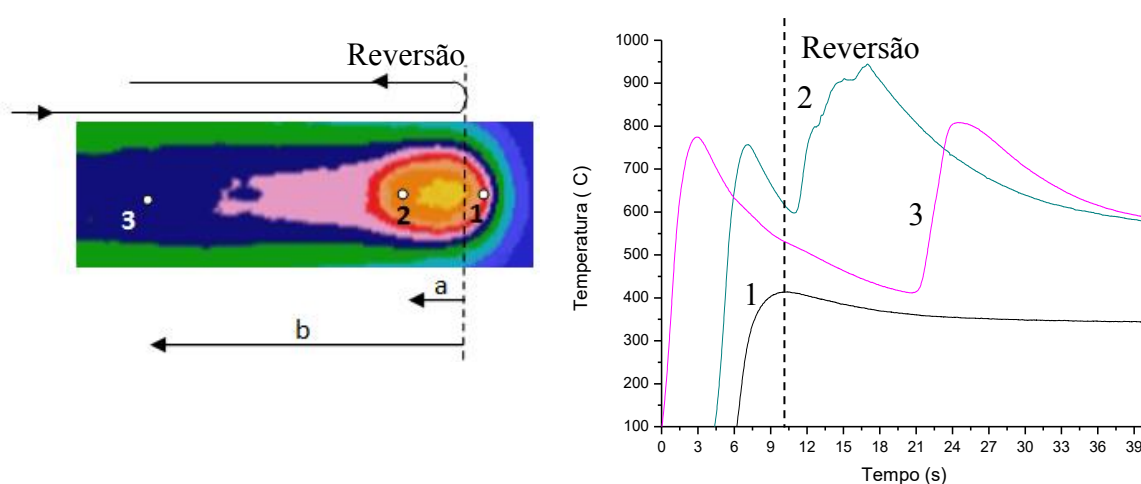


Figura 4.24 – Comportamento da temperatura sob a placa de teste soldada a 44 cm/min nos pontos 1, 2 e 3 localizados em diferentes comprimentos da reversão, onde a=10 mm e b=60 mm (a linha tracejada representa o momento aproximado em que a tocha passa para a reversão)

Tabela 4.5 – Temperaturas máximas e mínimas para os tempos de esfriamento dos pontos da Figura 4.24

Ponto	Reversão (mm)	$T_{\max 1}$ (°C)	T_{\min} (°C)	Tempo de esfriamento de $T_{\max 1}$ até T_{\min} (s)	$T_{\max 2}$ (°C)	$\Delta T_{800-500}$ (°C/s)
1	----	412	----	----	----	----
2	a=8	754	599	3,75	941	8,57
3	b=60	771	412	18	808	8,12

Antes de serem novamente reaquecidos com a reversão da tocha, as temperaturas nos pontos 2 e 3 foram reduzidas, devido ao esfriamento da poça de fusão, atingindo valores de, respectivamente, 599°C e 412°C. O tempo que levou para que estes dois pontos esfriassem até estas temperaturas foi de 3,75 s e 18 s, respectivamente. Como já foi verificado, o tempo de esfriamento de 1,5 s foi suficiente para promover mudanças na estrutura bruta de fusão próxima à linha de fusão, indicando que já havia iniciado o processo de solidificação no fundo do cordão antes de ser reaquecido. Então, pode-se afirmar que no tempo de 3,75 s (adquirido no ponto 2), o metal líquido no fundo do cordão já estaria solidificado, sendo possível a ocorrência de transformações no estado sólido. Finalmente, após o reaquecimento destes dois pontos com a reversão, a temperatura máxima alcançada foi de, respectivamente, 941°C e 808°C.

Tweed e Knott (1983), em seu trabalho sobre a avaliação do efeito do reaquecimento sobre a microestrutura e a tenacidade do metal de solda C-Mn, observaram uma estrutura de solidificação similar às obtidas para os comprimentos de 10 mm e 60 mm do início da reversão, na condição de velocidade de soldagem de 44 cm/min. Eles realizaram soldagens multipasses com o processo eletrodo revestido para preencher placas de teste com chanfro em “V” (45°) e com 25 mm de espessura. Em seguida, foram retiradas amostras de cada placa de teste soldada, as quais foram reaquecidas a diferentes níveis de temperatura máxima (uma até 900°C e a outra até 1250°C). As microestruturas obtidas por Tweed e Knott (1983) são apresentadas na Figura 4.25.

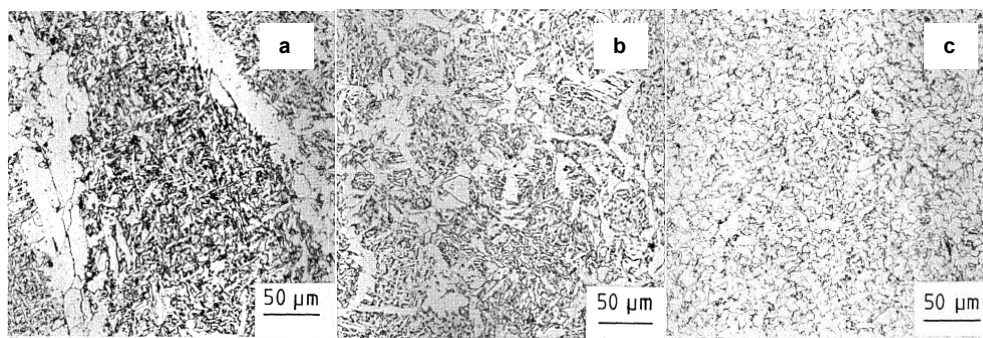


Figura 4.25 - Microestruturas obtidas por Tweed e Knott (1983): (a) como soldado; (b) aquecimento a 1250°C; (c) Aquecimento a 900°C

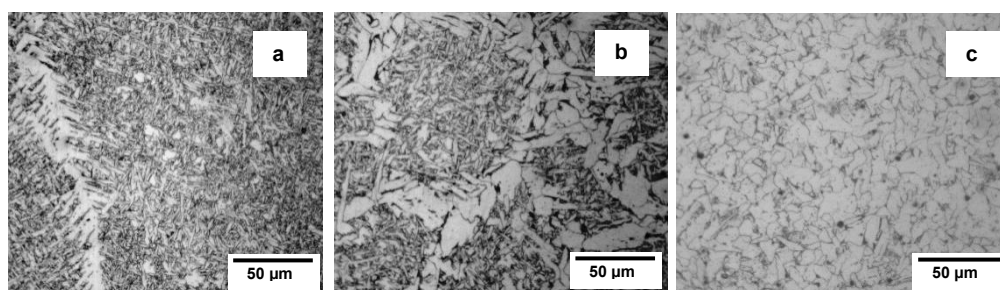


Figura 4.26 – Microestruturas obtidas do metal de solda na soldagem com 44 cm/min: (a) região afastada da linha de fusão, a 10 mm do início da reversão; (b) região próxima à linha de fusão, a 10 mm do início da reversão; e (c) região próxima à linha de fusão, a 60 mm do início da reversão

Para efeito de comparação com o trabalho de Tweed e Knott (1983), as microestruturas observadas neste trabalho são apresentadas na Figura 4.26. Comparando-se essas figuras, é possível observar a semelhança entre as microestruturas obtidas. Tal fato sugere que a estrutura de solidificação apresentada na Figura 4.26(a) não sofreu tratamento térmico, ou seja, ela se encontra no estado bruto de fusão. Aquela apresentada na Figura 4.26(b), ao contrário, foi submetida a um tratamento térmico com temperatura máxima próxima de 1250°C. Finalmente, a estrutura indicada na Figura 4.26(c) também foi submetida a um tratamento térmico, porém com temperatura máxima menor e próxima a 900°C. Entretanto, como já foi apresentado, as temperaturas máximas obtidas a 10 mm e a 60 mm do início da reversão foram de, respectivamente, 941°C e 808°C. Esta diferença nos valores de temperatura máxima mostra a dificuldade em se saber o real valor da temperatura obtido sob o cordão, quando se utiliza a câmera termográfica.

Outro aspecto importante, além da temperatura máxima, é a taxa de esfriamento de 800°C até 500°C ($\Delta T_{800-500}$) durante a reversão. Ela foi estimada em 8,57 °C/s no ponto 1 e 8,12 °C/s no ponto 2. Esta baixa taxa de esfriamento também pode ter favorecido para que

ocorressem as transformações no estado sólido, resultando na formação de grãos equiaxiais próximo à linha de fusão.

Com relação à soldagem produzida com 56 cm/min, os perfis da temperatura obtidos sob a placa de teste, em diferentes pontos da reversão, são apresentados na Figura 4.27. A Tabela 4.6 apresenta os valores de temperatura e tempo de esfriamento em cada ponto analisado. Nota-se que, na etapa de avanço da tocha, que os pontos 1 (fora da reversão), 2 (à 10 mm do início da reversão) e 3 (à 60 mm do início da reversão) foram aquecidos e atingiram temperaturas máximas de, respectivamente, 485°C, 694°C e 664°C. Estas temperaturas foram menores do que no caso anterior em função da maior velocidade de soldagem utilizada. Antes de serem novamente reaquecidos com a reversão da tocha, as temperaturas nos pontos 2 e 3 foram reduzidas, atingindo valores de, respectivamente, 567°C e 363°C. Os tempos que levaram para que estes dois pontos esfriassem até essas temperaturas foram de 3,50 s e 15,34 s, respectivamente. Assim como no caso anterior, pode-se afirmar que no tempo de 3,5 s (adquiridos no ponto 2), o metal líquido no fundo do cordão já estaria solidificado. Finalmente, após o reaquecimento destes dois pontos com a reversão, as temperaturas máximas alcançadas foram de, respectivamente, 853°C e 758°C.

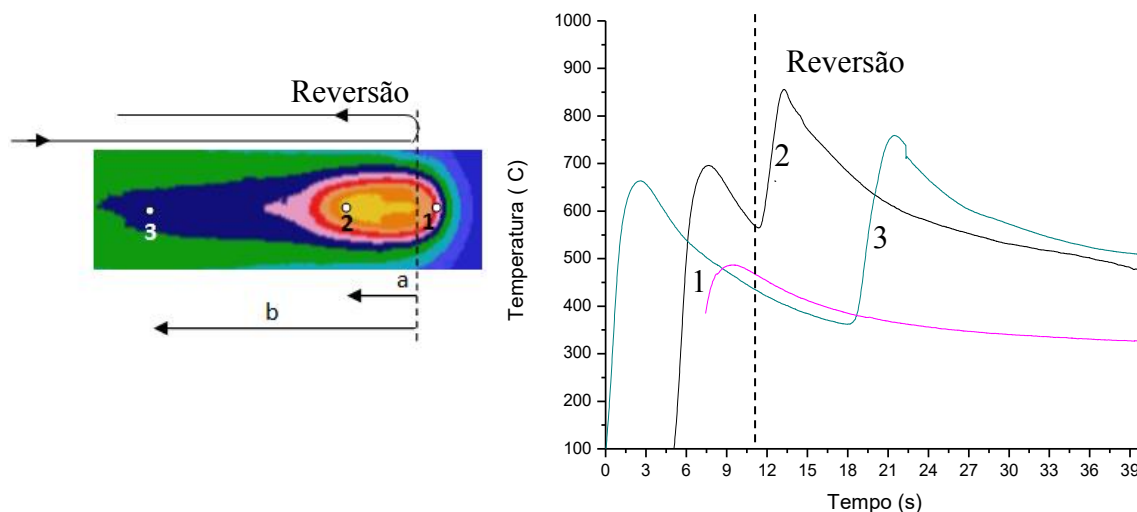


Figura 4.27 – Comportamento da temperatura sob a placa de teste soldada com 56 cm/min nos pontos 1, 2 e 3 localizados em diferentes comprimentos da reversão, onde a=10 mm e b=60 mm

Tabela 4.6 – Temperaturas máximas e mínimas para os tempos de esfriamento dos pontos da Figura 4.27

Ponto	Reversão (mm)	T _{max1} (°C)	T _{min} (°C)	Tempo de esfriamento de T _{max1} até T _{min} (s)	T _{max2} (°C)	ΔT ₈₀₀₋₅₀₀ (°C/s)
1	----	485	----	----	----	----
2	a = 10	694	567	3,70	853	13,64
3	b = 60	664	363	15,34	758	12,82

No caso desta soldagem, não foi possível observar a formação de grãos equiaxiais próximo à linha de fusão, ou seja, não existiram indícios da ocorrência de algum tratamento térmico. Apesar de achar que o fundo do cordão já estaria solidificado antes da reversão da tocha e com uma temperatura máxima alcançada no ponto 2 (853°C) favorável para promover algum tratamento térmico, a estrutura de solidificação encontrada para esta solda foi colunar, no trecho de 20 mm após a reversão. No caso do ponto 3, foi possível observar a recristalização de grãos no metal de solda, indicando a ocorrência de tratamento térmico com a reversão. Isto pode estar ligado com a temperatura máxima encontrada neste ponto (758°C), que pode ter se aproximado da temperatura de 900°C, sendo difícil esta análise em função da dificuldade em se conseguir o real valor da temperatura sob o cordão.

d) O efeito da sobreposição

Nos primeiros 20 mm da reversão da solda produzida com velocidade de 56 cm/min, foi observada uma estrutura de solidificação colunar. Já naquela realizada com 44 cm/min, verificou-se, neste trecho, uma estrutura com grãos equiaxiais próximo à linha de fusão. Em ambos os casos, após os 20 mm do início da reversão foi observada uma estrutura de solidificação com grãos recristalizados próximo à linha de fusão, tal como observado em uma soldagem multipasses, devido ao tratamento térmico de normalização que um cordão realiza sobre o outro depositado anteriormente.

Estes resultados foram relacionados com a temperatura máxima alcançada nas regiões de análise, ou seja, à 10 mm de reversão (dentro do trecho de 20 mm) e à 60 mm da reversão (fora do trecho de 20 mm). Foi considerado nestes experimentos que houve tempo suficiente para que o fundo do cordão já estivesse solidificado antes da reversão em 10 mm. Foram obtidas temperaturas máximas adequadas para que permitisse a ocorrência de

transformações no estado sólido no fundo do cordão. Entretanto, apenas para o caso da soldagem com 56 cm/min, não foi possível observar indícios de tratamento térmico (dentro de 20 mm), pois a estrutura apresentou-se no estado bruto de fusão, com grãos colunares.

Passou-se, então, a cogitar que nesta condição de velocidade de soldagem, por algum motivo, a convecção da poça de fusão fosse favorável para levar o fluxo de metal líquido até a região previamente solidificada, refundindo-a completamente. Então, novas soldas foram produzidas com a finalidade de avaliar como essa convecção poderia estar atuando sobre o metal já solidificado. Foram produzidas duas soldas com uma única reversão, uma com velocidade de soldagem de 60 cm/min (menor energia imposta) e a outra, com 40 cm/min (maior energia imposta). Adotou-se estes dois níveis de velocidade com o objetivo de verificar se os resultados obtidos nos experimentos anteriormente poderiam ser novamente observados com velocidades abaixo de 44 cm/min e acima de 56 cm/min, o que confirmaria a dada tendência. As análises da estrutura de solidificação destas soldas foram realizadas na seção transversal situada à 8 mm e à 70 mm da reversão.

Em seguida, novas amostras foram reproduzidas para que fosse analisada a estrutura de solidificação na seção longitudinal. A Figura 4.28 apresenta a aparência destas soldas. Mais uma vez, verifica-se o acúmulo de material, nas duas condições de soldagem, nos 20 mm iniciais da reversão, devido a menor velocidade neste trecho (inércia do robô).

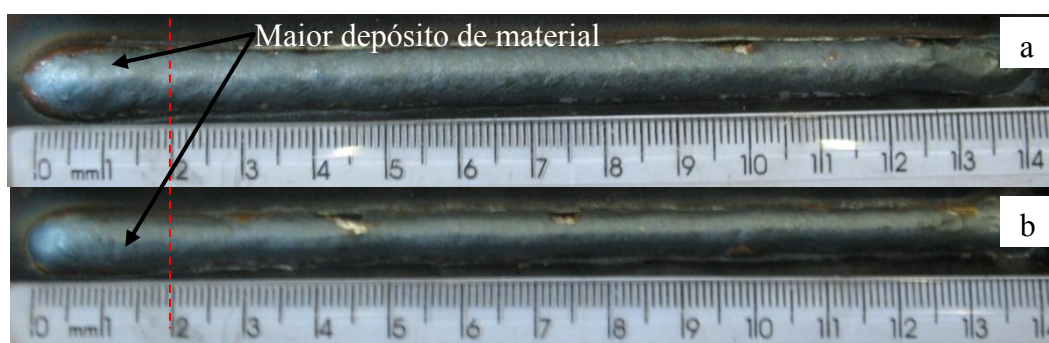


Figura 4.28 - Soldagens produzidas com uma única reversão da técnica switchback: (a) velocidade de soldagem de 40 cm/min (menor energia imposta); (b) velocidade de soldagem de 60 cm/min (maior energia imposta)

Em função desta menor velocidade, buscou-se observar o valor da penetração neste trecho da reversão e comparar com a penetração obtida no meio cordão. As Figuras 4.29 e 4.30 apresentam os perfis de penetração, bem como as estruturas de solidificação, da seção transversal dos cordões obtidos com velocidades de soldagem de, respectivamente, 60 cm/min e 40 cm/min. Por intermédio da Figura 4.29, nota-se que a penetração obtida

para a solda produzida com 60 cm/min foi de 1,81 mm à 8 mm do início da reversão e de 1,23 mm à 70 mm (no meio do cordão). Este resultado está coerente, pois, como já mencionado, a velocidade de soldagem é menor do que 60 cm/min até, aproximadamente, 20 mm do início da reversão. Verifica-se, ainda nessa figura, que à 8 mm da reversão (seção AA) foi obtida uma estrutura bruta de fusão, totalmente colunar, enquanto no meio do cordão (seção BB) foi obtida uma estrutura com grãos recristalizados no fundo do cordão, próximo à linha de fusão. Neste caso, foi possível delinear a transição entre a estrutura bruta de fusão (obtida pela refusão parcial do metal previamente depositado no avanço) e aquela recristalizada (obtida devido ao tratamento térmico).

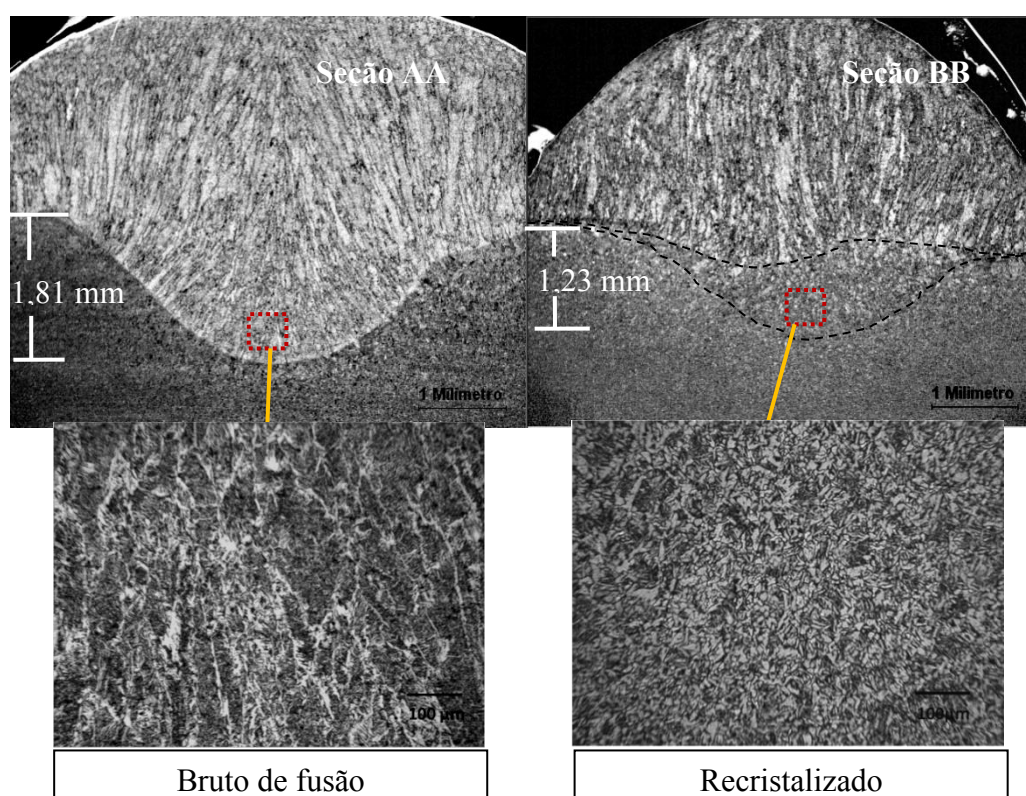


Figura 4.29 – Seções transversais em diferentes posições da soldagem *puxando-empurrando* com 140 mm de avanço e 140 mm de reversão: a seção AA está à aproximadamente 8 mm do ponto de reversão, enquanto a seção BB está a 70 mm (Velocidade de soldagem de 60 cm/min)

Resultado similar foi observado para a penetração do cordão produzido com velocidade de 40 cm/min (Figura 4.30), ou seja, foi obtido um valor de 1,67 mm à 8 mm do início da reversão, maior do que aquele de 1,36 mm, verificado no meio do cordão. Com relação a estrutura de solidificação, à 8 mm da reversão foi obtida uma estrutura predominantemente colunar. Porém, próximo à linha de fusão, é possível notar uma estrutura com grãos

equiaxiais, indicando que o fundo do cordão sofreu alguma recristalização. No meio do cordão, assim como no caso anterior, também foi obtido uma estrutura com grãos recristalizados no fundo do cordão, próximo à linha de fusão. Novamente, foi possível delinear a transição entre a estrutura bruta de fusão e aquela recristalizada. Esperava-se que a penetração desta solda fosse maior, tanto à 8 mm quanto a 70 mm do início da reversão, devido a utilização de uma menor velocidade de soldagem. No entanto, isto foi verdadeiro apenas no meio do cordão, pois à 8 mm a penetração foi menor. Então, buscou-se observar o perfil da penetração na seção longitudinal das replicações produzidas destas soldas, dentro do trecho de 20 mm. De acordo com a Figura 4.31, a penetração variou bastante dentro deste trecho, para as duas soldas, sendo que foi sempre maior para a condição de menor velocidade. Foi verificada uma penetração média de 1,7 mm para a condição de 40 cm/min e de 1,5 mm para a condição de 60 cm/min.

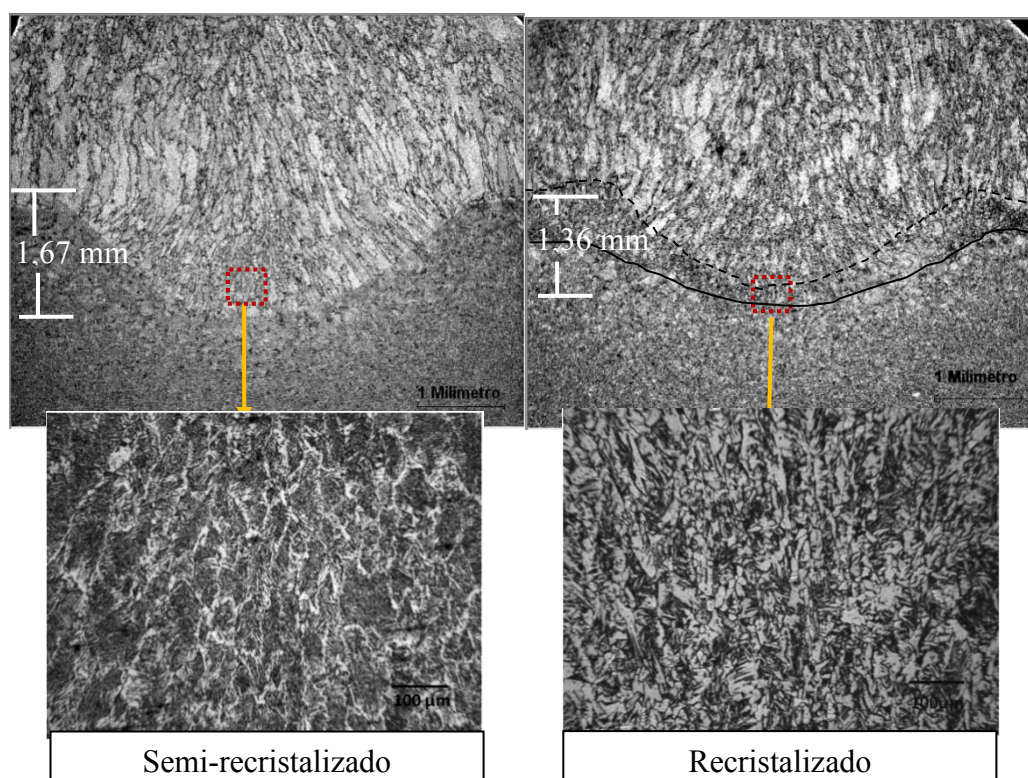


Figura 4.30 – Seções transversais em diferentes posições da soldagem *puxando-empurrando* com 140 mm de avanço e 140 mm de reversão, a uma velocidade equivalente de soldagem de 40 cm/min (a seção AA está à aproximadamente 8 mm do ponto de reversão, enquanto a seção BB está a 70 mm)

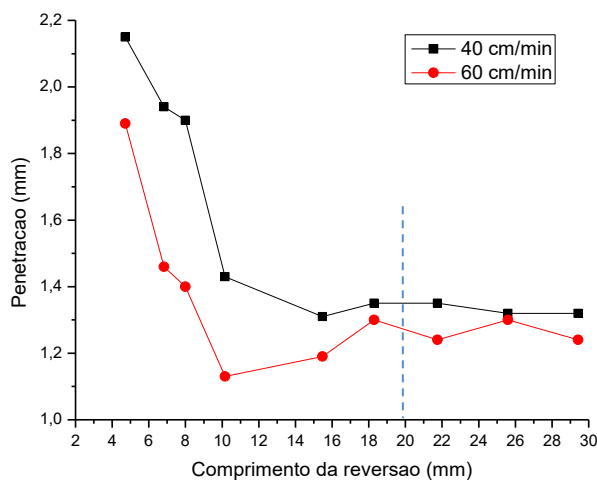


Figura 4.31 – Comportamento da penetração das soldas replicadas apresentadas nas figuras 4.28 (obtido na seção longitudinal)

Os perfis da penetração, bem como as estruturas de solidificação, obtidos na seção longitudinal das replicações produzidas com 60 cm/min e 40 cm/min estão apresentados nas Figuras 4.32 e 4.33, respectivamente. Percebe-se na Figura 4.32 que o metal de solda produzido com 60 cm/min apresentou uma estrutura de solidificação típica de estado bruto de fusão, fortemente colunar, dentro dos 20 mm do início da reversão. Fora deste trecho, a cerca de 30 mm do início da reversão, observou-se uma estrutura com grãos equiaxiais próximo à linha de fusão, indicando o início da recristalização no fundo do cordão. Este resultado corrobora aquele observado na Figura 4.22, onde à 8 mm da reversão (dentro do trecho) foi obtida uma estrutura colunar do metal de solda e à 70 mm da reversão (fora do trecho) foi observada a recristalização, de forma mais nítida, no fundo do cordão.

Já o metal de solda produzido com 40 cm/min (Figura 4.33) apresentou uma estrutura de solidificação com grãos recristalizados no fundo do cordão dentro do trecho de 20 mm do início da reversão, a qual se estendeu ao longo de todo o comprimento da solda. Foi possível delimitar a transição entre a região recristalizada (com grãos equiaxiais) e aquela no estado bruto de fusão (com grãos colunares). Na região de recristalização, dentro dos 20 mm, foi observado o crescimento de grãos equiaxiais, indicando que esta região foi superaquecida.

É conhecido da literatura que a penetração da solda tende a ser maior com a redução da velocidade de soldagem. Entretanto, isto é verdadeiro até certo limite de velocidade, pois se for empregado no processo um valor menor do que este limite ocorre o efeito inverso, ou seja, a penetração tende a diminuir. Isto é explicado pelo efeito da interposição de metal líquido da poça entre o acoplamento do arco e o metal de base não fundido, que dificulta o

contato do arco elétrico com o metal de base (SCOTTI e PONOMAREV, 2008). Pode ser que para o caso da soldagem com 40 cm/min, esteja prevalecendo o efeito da interposição no momento da reversão. Como no trecho de 20 mm a tocha permanece mais tempo do que no restante do cordão, a interposição de metal líquido é maior e dificulta o contato do arco elétrico com o metal de base. Assim, durante a reversão, a penetração tende a ser menor, não refundindo os grãos já solidificados no fundo do cordão.

No caso da velocidade de 60 cm/min, no trecho de 20 mm, a tocha permanece mais tempo do que no restante do cordão, porém permanece menos tempo que na soldagem com 40 cm/min (isto pode ser percebido pela menor quantidade de material neste trecho na soldagem com 60 cm/min – vide figura 4.29).

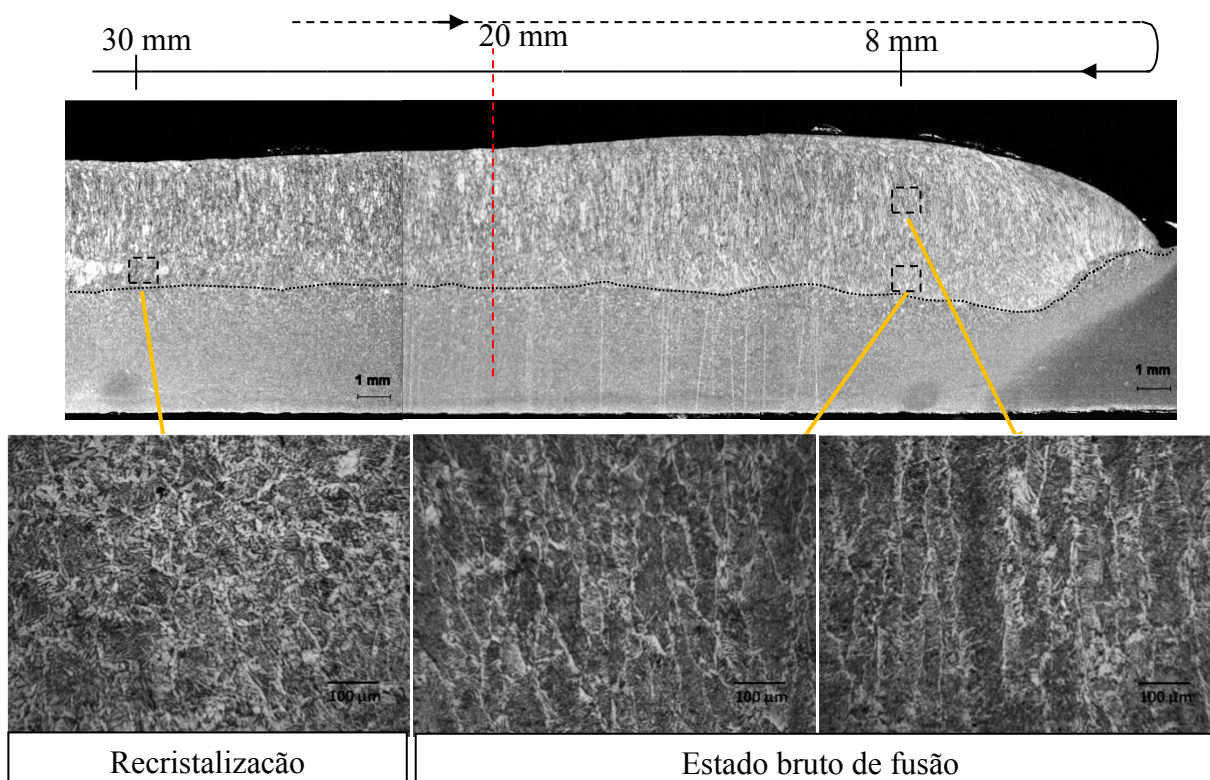


Figura 4.32 – Estrutura de solidificação do cordão no trecho de 20 mm de reversão (velocidade menor do que 60 cm/min) e após 20 mm (velocidade igual a 60 cm/min)

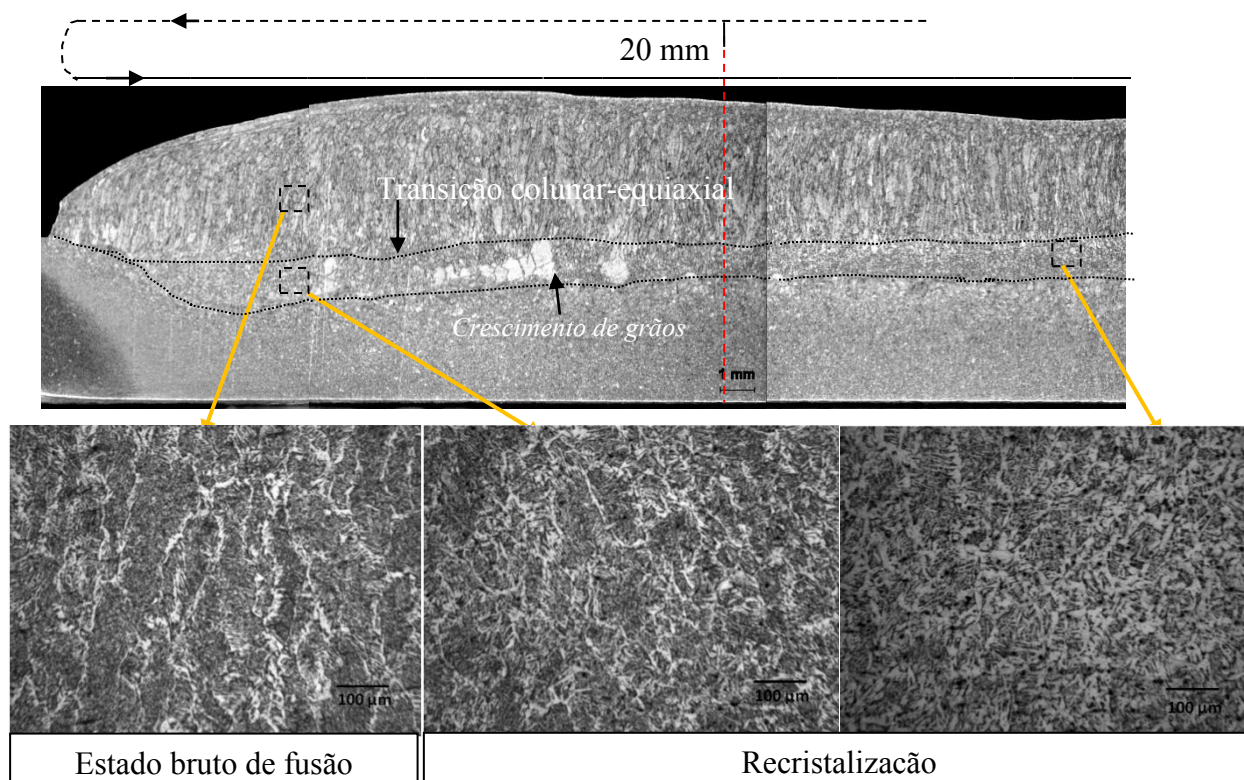


Figura 4.33 – Estrutura de solidificação do cordão no trecho de 20 mm de reversão (velocidade menor do que 40 cm/min) e após 20 mm (velocidade igual a 40 cm/min)

Assim, a quantidade de metal para sobrepor o metal de base durante a reversão foi menor, não sendo suficiente para dificultar a ação do arco elétrico sobre o metal de base, entregando mais calor e refundindo os grãos já solidificados no fundo do cordão.

Pela discussão acima, o emprego de maiores níveis de velocidade de soldagem na tocha iria favorecer a refusão dos grãos solidificados no fundo do cordão, em função do aumento da penetração da poça de fusão (redução do efeito de interposição da poça). Mas, as soldagens com múltiplas reversões de 10-5 e 30-20 foram produzidas com altas velocidades (74 cm/min para 10-5 e 111 cm/min para 30-20) e mesmo assim foi possível observar a recristalização. Pode ser que a interposição da poça líquida tenha efeito nas soldagens com múltiplas reversões, mesmo com o emprego de altas velocidades.

4.5.3 Análise de múltiplas reversões

Nas soldas anteriores, a análise da estrutura de solidificação foi realizada com uma única reversão. Entretanto, na soldagem switchback existem múltiplas reversões. Assim, para avaliar os resultados de uma forma mais próxima da situação real de soldagem, novos

experimentos foram propostos, agora com mais de uma reversão. Inicialmente, foi realizada uma soldagem switchback com apenas um ciclo de reversão da tocha. Adota-se aqui um ciclo de reversão como sendo dois avanços consecutivos que a tocha realiza e interligados por uma única reversão, como indicado na Figura 4.34. Para manter constante a velocidade equivalente de 25 cm/min a velocidade empregada na tocha durante as fases de avanço e recuo foi de 32 cm/min. Em seguida, outra solda foi produzida com a técnica; agora com dois ciclos de reversão da tocha. Para manter constante a velocidade equivalente de 25 cm/min a velocidade empregada na tocha durante as fases de avanço e recuo foi de 39 cm/min. Para analisar a estrutura de solidificação dos cordões produzidos foram obtidas imagens (macro e micrografias) das seções (longitudinal) previamente polidas e atacadas com Nital 2%.

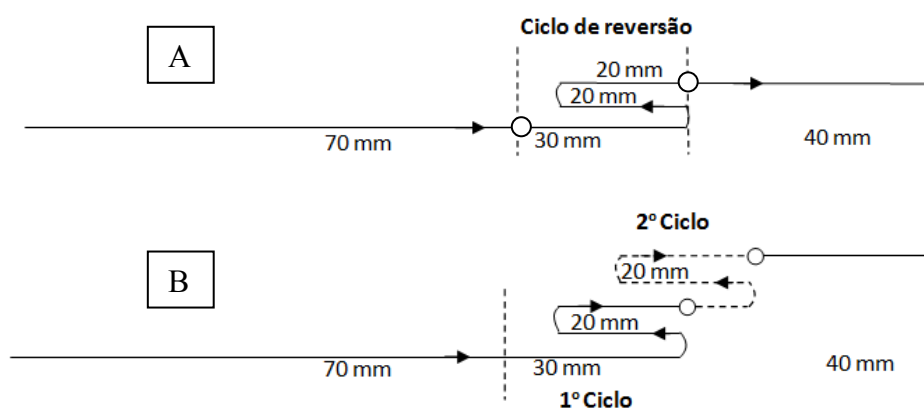


Figura 4.34 – Ilustração dos ciclos de reversão utilizados. (A) Ciclo de avanço-reversão-avanço (100-20-60) = real. (B) Ciclo de avanço-reversão-avanço-reversão-avanço (100-20-30-20-60)

A Figura 4.35 apresenta o aspecto superficial do cordão obtido com um ciclo de reversão. Nota-se nessa figura que devido a este ciclo, houve a deposição de uma maior quantidade de material metálico. Pode ser observado ainda que durante a etapa de recuo da tocha o metal, ainda líquido, avançou cerca de 15 mm sobre o metal depositado anteriormente. O jato de plasma certamente atuou sobre esta maior massa líquida, empurrando-a para os lados e, devido ao recuo, impulsionando o metal líquido mais intensamente para traz.



Figura 4.35 – Aspecto superficial do cordão obtido com uma reversão: $V_{\text{tocha}} = 32 \text{ cm/min}$ (no avanço e na reversão); $V_{\text{equiv}} = 25 \text{ cm/min}$ (ciclo de avanço-reversão-avanço (100-20-60) = real)

A macroestrutura da seção longitudinal do metal de solda acima, no trecho de 65 mm a 100 mm, está apresentada na Figura 4.36. Com o auxílio dessa figura é possível observar duas diferentes regiões do metal de solda, uma (região 1) onde a tocha passa uma vez e a outra (região 2) onde a tocha passa 3 vezes. Na região 1, verifica-se a ocorrência da refusão do material depositado anteriormente durante o avanço da tocha. Apesar da tocha não atingir esta região durante o seu recuo, a poça líquida formada sobrepõe aquele material já solidificado, refundindo-o até, aproximadamente, 15 mm do ponto de parada de recuo. Nesta extensão (15 mm), entretanto, a refusão ocorre totalmente por um comprimento aproximado de 10 mm. É evidente a linha de fusão que separa os grãos colunares solidificados na etapa de avanço da tocha (a) dos grãos colunares solidificados no recuo da tocha (b). O tempo total que a tocha levou para avançar de 70 mm até 100 mm e depois recuar até 80 mm foi de 9,4 s. Este tempo foi suficiente para que o material depositado na região I durante o avanço da tocha solidificasse antes de ser refundido. Ainda nesta região I, pode-se notar que, próximo à linha de fusão, formou-se uma estrutura de solidificação com grãos equiaxiais (c) e (d), sendo com maior tamanho na região de maior penetração, indicando um superaquecimento do cordão. A Figura 4.37 apresenta as micrografias obtidas para a estrutura de solidificação localizada próxima à linha de fusão.

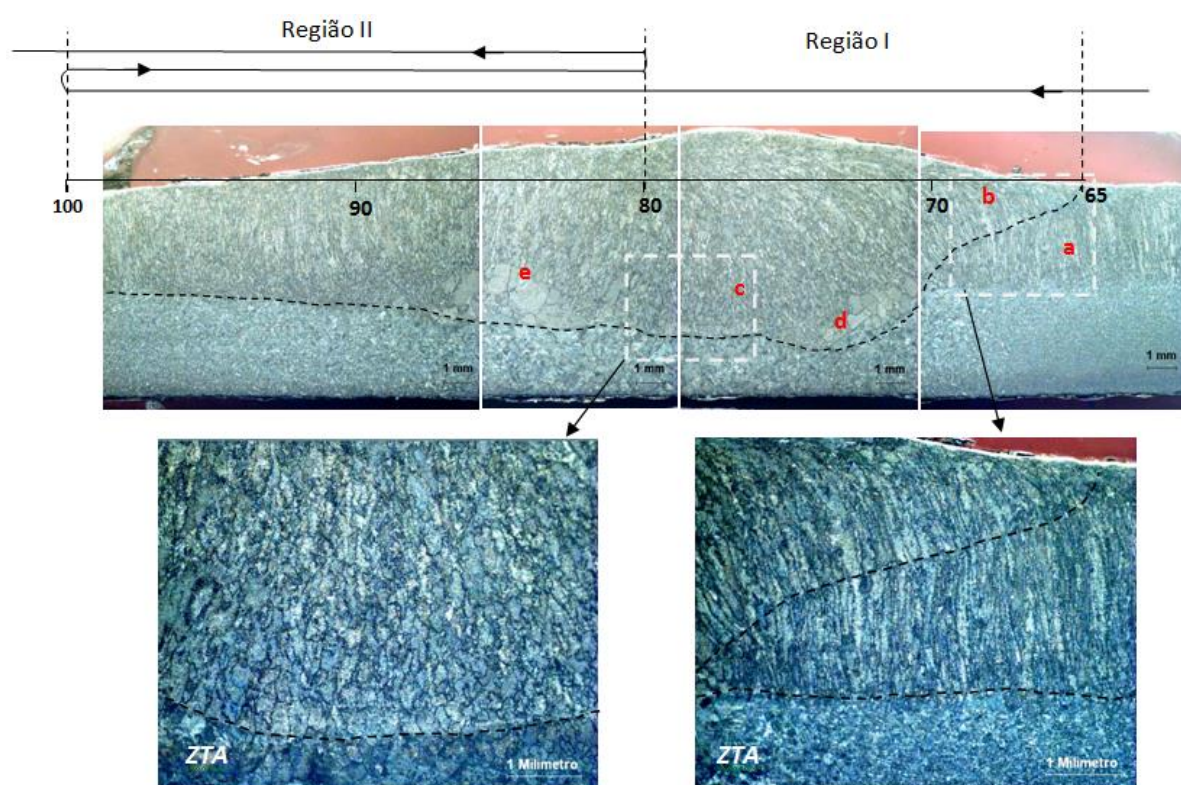


Figura 4.36 – Aspecto macrográfico da região do cordão sob uma reversão da tocha (ciclo de avanço-reversão-avanço (100-20-60) = real)

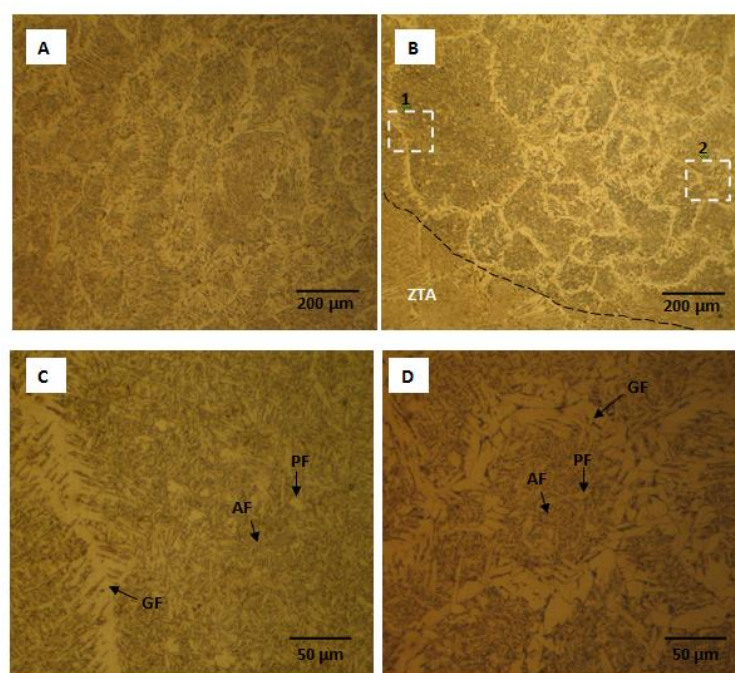


Figura 4.37 – Microestruturas do metal de solda sob um ciclo de reversão: (A) região indicada pela letra **c** da Figura 4.36; (B) região indicada pela letra **d** da Figura 4.36; (C) e (D) regiões indicadas em 1 e 2 na figura 4.37(B)

Por comparação com imagens de microestruturas obtidas, através microscopia óptica para a soldagem de aço carbono (LINEART, 2000), foi possível definir alguns microconstituintes. Na realidade, os grãos observados na Figura 4.37 são compostos por ferrita acicular (AF), ferrita poligonal (PF) e ferrita de contorno de grão (GF) que se formaram pela transformação dos grãos da austenita com o resfriamento contínuo do cordão. Apesar de estar em pouca quantidade, a presença de ferrita poligonal é um indicativo do superaquecimento do cordão, pois é observada em condições de baixa taxa de esfriamento. Foi muito importante observar a presença de ferrita acicular, pois ela garante boa tenacidade para a solda.

Estrutura similar àquelas apresentadas na Figura 4.37 (B) foi apresentada por Samuels (1992, pg. 170) na soldagem multipasses de aço carbono pelo processo TIG. Esta estrutura de solidificação com grãos recristalizados foi visualizada no último passe de preenchimento do chanfro e especificamente próximo à linha de fusão. A dureza desta microestrutura foi de 210 HV enquanto a microestrutura mais afastada da linha de fusão, com característica fortemente colunar, apresentou dureza de 200 HV. Ilka (2006), em seu trabalho sobre a influência da microestrutura no comportamento mecânico de juntas soldadas de aço estrutural, também observou uma estrutura de solidificação similar, na soldagem por arco submerso. Na condição como soldado, a estrutura de solidificação apresentou-se colunar. Porém, após tratamento térmico de têmpera, a microestrutura foi observada e apresentou os mesmos constituintes apresentados na Figura 4.37 (AF, PF e GF). Durante o tratamento térmico, as soldas foram aquecidas até 1225 °C e, em seguida, resfriadas em água. Ela verificou que a dureza desta microestrutura obtida com o tratamento foi de 192 HV, enquanto para o metal de solda, na condição como soldado, foi de 185 HV. A energia de impacto das amostras retiradas das soldas tratadas termicamente foi de 43 J, superior àquela obtida de amostras retiradas na condição como soldado que foi de 36 J.

Voltando-se à Figura 4.36, observa-se na região II estruturas similares próximas à linha de fusão. Porém, aparentemente, estão com maior tamanho (ver ponto e) em função do superaquecimento do metal de solda pelo arco elétrico ter passado 3 vezes nesta região. Acredita-se que esta região também foi refundida. O tempo total que levou a tocha para avançar da posição de 80 mm até 100 mm e depois recuar até 90 mm foi de 5,7 s. Neste tempo, acredita-se que o metal depositado entre o trecho de 80 mm até 90 mm já havia solidificado. O mesmo raciocínio pode-se ter para o trecho de 90 mm a 100 mm, ou seja, também teve um tempo de 5,7 s para solidificar. Aproveitando ainda a Figura 4.36, observa-se que a superfície do cordão no ponto da mudança de recuo para avanço da tocha (80 mm do comprimento do cordão) apresentou uma depressão. Isto caracteriza uma falta de material metálico no momento em que o arco elétrico sai repentinamente deste ponto.

Procurou-se verificar, então, se estes resultados poderiam repetir para uma condição de dois ciclos de reversão. Os resultados são apresentados a seguir. A Figura 4.38 ilustra o aspecto superficial do cordão obtido com dois ciclos de reversão. Pode ser observado nesta Figura que durante o recuo da tocha no 1º ciclo, o metal, ainda líquido, avançou cerca de 18 mm sobre o metal depositado anteriormente.

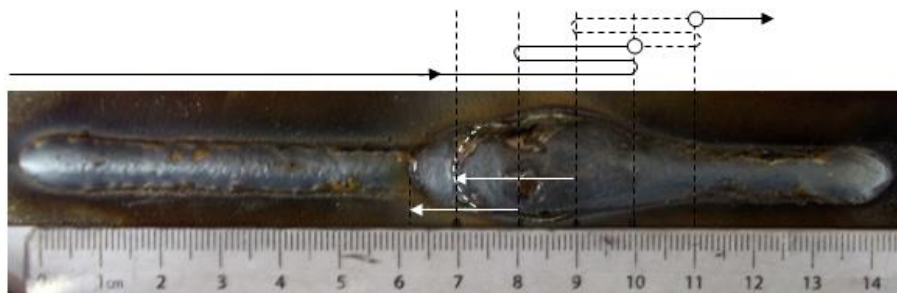


Figura 4.38 – Aspecto superficial do cordão obtido com duas reversões ($V_{\text{tocha}} = 39 \text{ cm/min}$ no avanço e na reversão), com ciclo de avanço-reversão-avanço-reversão-avanço (100-20-30-20-60)

No seguinte recuo referente ao 2º ciclo, o metal avançou aproximadamente 21 mm. Estes maiores avanços da poça de fusão sobre o metal já solidificado podem ter ocorrido em função da maior velocidade de soldagem empregada na tocha, 39 cm/min, permitindo que o jato de plasma empurrasse o metal líquido ainda mais longe. A macroestrutura da seção longitudinal do metal de solda acima, no trecho de 62 mm a 100 mm, está apresentada na Figura 4.39. Essa figura mostra que o material depositado durante o primeiro ciclo da reversão da tocha foi parcialmente fundido pela poça de fusão formada durante o segundo ciclo. Isto fez com que a região I discutida anteriormente fosse menor neste caso. Já a região II do primeiro ciclo de reversão foi totalmente fundida. Isto mostra que na soldagem Switchback a estrutura de solidificação observada no metal de solda é aquela que surge na região I mencionada (região de interesse), a cada ciclo de reversão. A região I do primeiro ciclo apresentou uma estrutura de solidificação semelhante ao mostrado anteriormente. As microestruturas do metal de solda nesta região próximo à linha de fusão e a da ZTA são apresentadas na Figura 4.40. Percebe-se o formato equiaxial dos grãos do metal de solda e a estrutura grosseira obtida na ZTA. De acordo com Lineart (2000), esta estrutura de grãos grosseiros obtida para a ZTA surge quando o material de base, imediatamente adjacente ao metal de solda, é aquecido a uma temperatura próxima de 1350°C. Este severo aquecimento da ZTA causa o crescimento de grãos durante a fase de

austenitização e produz constituintes grosseiros com o contínuo resfriamento até a temperatura ambiente. A tenacidade desta região da ZTA é em geral muito pobre.

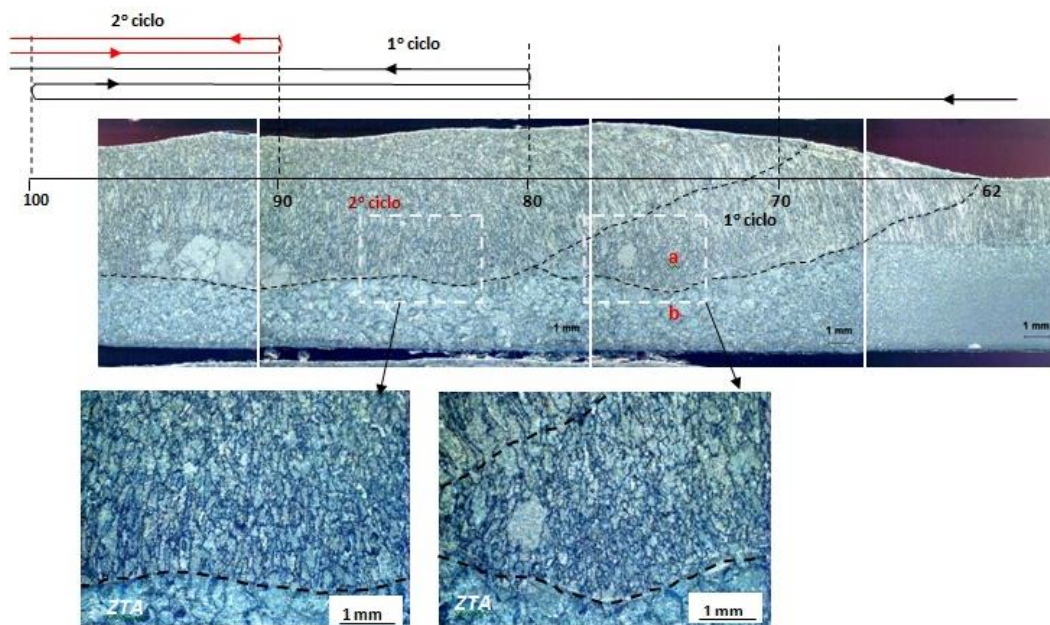


Figura 4.39 – Aspecto macrográfico da região do cordão sob dois ciclos de reversão idem Ciclo de avanço-reversão-avanço-reversão-avanço (100-20-30-20-60)

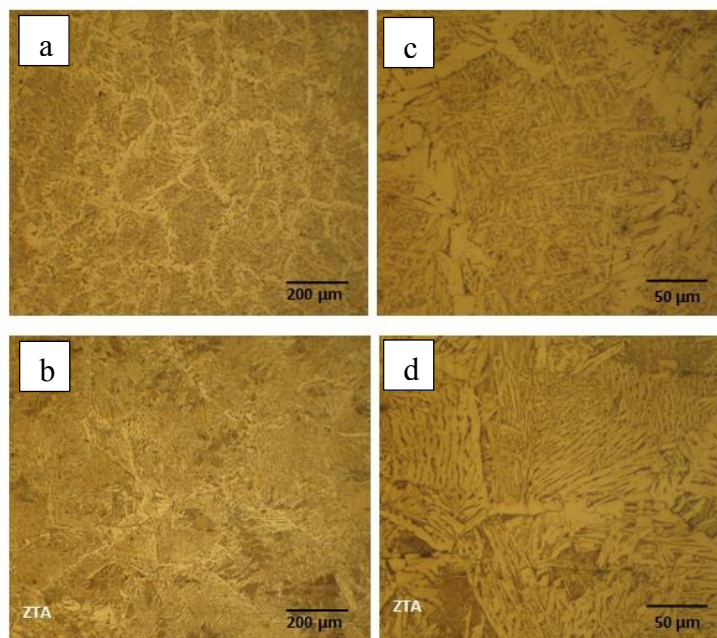


Figura 4.40 – Efeito do superaquecimento na soldagem: (a) e (b) microestruturas observadas, respectivamente, em a (metal de solda) e b (ZTA) indicados na Figura 4.39; (c) e (d) são as mesmas imagens ampliadas

Com relação ao segundo ciclo de reversão, novamente foi observado uma estrutura de solidificação com grãos equiaxiais próximo à linha de fusão, tanto na região em que a tocha passa três vezes (região I do segundo ciclo) quanto naquela outra em que a tocha passa cinco vezes (região II do segundo ciclo). Porém, nesta última, os grãos tenderam a crescer demasiadamente, como o observado entre o trecho de 90 mm a 100 mm do cordão. Esperava-se que aqueles grãos próximos à linha de fusão, onde o arco refunde por três vezes o metal de solda, também aumentassem de tamanho. Entretanto, talvez isto não tenha ocorrido em função da maior velocidade da tocha de soldagem (39 cm/min). Os resultados obtidos nestes experimentos indicam que, para uma mesma velocidade equivalente de soldagem, o emprego da técnica promove um maior aquecimento do metal de solda. Assim, tanto o metal de solda quanto o metal de base podem ser submetidos a maiores níveis de temperatura e maior tempo de esfriamento. Estas condições de temperatura e tempo favorecem a um tratamento térmico no cordão próximo à linha de fusão e, ao mesmo tempo, a um crescimento de grão da ZTA.

CAPÍTULO V

Otimização das Variáveis da Técnica Switchback para Controlar a Poça de Fusão Visando Confeção Robusta de Passes de Raiz

5.1 Metodologia adotada para avaliar o potencial da técnica quanto à robustez da penetração do cordão

Condições para soldagem MIG pulsado com o uso da técnica switchback que propiciam a produção de cordões com geometria e aspecto metalúrgico satisfatórios foram usadas na soldagem de juntas de topo (chanfro em “I”) com folga variável. A finalidade deste estudo foi observar o potencial da técnica em controlar a poça de fusão para garantir uma confecção mais robusta de passes de raiz. As variáveis da técnica (velocidade da tocha e reversão) foram modificadas para estudar o efeito das mesmas sobre este controle. Soldagens sem o emprego da técnica também foram realizadas para fins de comparação.

A folga foi variada dentro de um comprimento aproximado de 100 mm, de um comprimento total de 140 mm de uma chapa de teste, de um valor mínimo (f_1) até um valor máximo (f_2) durante os testes, como ilustra a Figura 5.1. Isto foi necessário para descartar os extremos do cordão. Para cada placa de teste soldada, procurava-se observar a máxima abertura de folga, a partir da qual o cordão já não apresentava mais regularidade na raiz. Caso esse limite não fosse observado, novas placas de teste eram soldadas com folgas cada vez maiores. Antes das soldagens, as placas de teste foram limpas por jateamento de areia. Em seguida, foram ponteadas com o processo eletrodo revestido. Finalmente, foram realizadas marcações nessas placas ponteadas, com a finalidade de indicar a variação da folga (Figura 5.1).

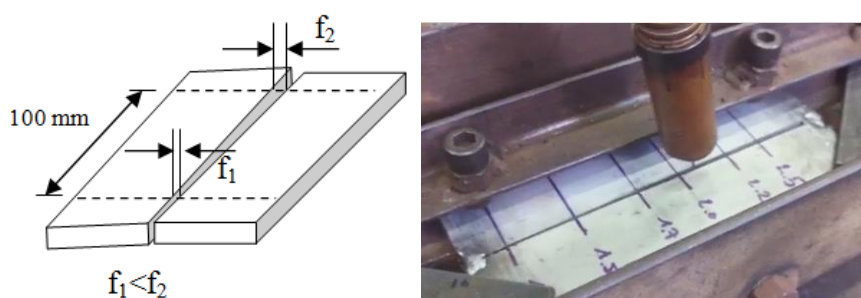


Figura 5.1 – Ilustração da placa de teste de uma junta de topo com folga variável

Durante esta etapa, as placas de teste utilizadas tiveram uma espessura menor do que na etapa anterior, ou seja, 3,6 mm. Isto foi necessário para garantir a penetração total. Por isto, procurou-se manter constante os mesmos parâmetros de soldagem utilizados anteriormente (velocidade de alimentação do arame, velocidade equivalente de soldagem, corrente média, composição química e vazão do gás de proteção, distância bico de contato peça, etc.), como resume a Tabela 5.1. Caso fosse necessário algum ajuste da penetração total, isto seria realizado por intermédio apenas da mudança na velocidade equivalente de soldagem.

Tabela 5.1 – Parâmetros operacionais da Soldagem MIG Pulsada

Valim (m/min)	Veq (m/min)	Im (A)	DBCP (mm)	Gás	vazão (l/min)
4,0	25	145	18	Ar+5%O ₂	15

onde, Valim é a velocidade de alimentação do arame, Veq é a velocidade equivalente de soldagem, Im é a corrente média, DBCP é a distância bico de contato

5.2 Comportamento da penetração dos cordões produzidos sem o emprego da técnica

A Figura 5.2 apresenta o comportamento da raiz dos cordões produzidos sem o emprego da técnica switchback, para uma variação total da folga de 0 mm até 2,5 mm. A estabilidade da raiz foi analisada em partes, ou seja, de 0 mm a 1,7 mm (placa de teste 1), de 0,5 mm a 2,0 mm (placa de teste 2) e de 1,0 mm a 2,5 mm (placa de teste 3), com o propósito de se refinar e encontrar o valor da folga máxima em que houve cordão. Pode ser observado no primeiro caso que a penetração total do cordão aconteceu a partir de uma abertura mínima da raiz de, aproximadamente, 0,2 mm e manteve-se estável até a folga de 1,7 mm. No segundo, a penetração iniciou com folga mínima de 0,5 mm e alcançou, com estabilidade, a abertura de 1,7 mm, quando, a partir deste ponto, passou a ser excessiva. Finalmente, no terceiro caso, a penetração começou na folga mínima de 1,0 mm e, novamente, manteve-se

estável até 1,7 mm. Observa-se ainda neste último caso que, para uma folga aproximada de 2,2 mm, houve o vazamento de metal líquido da poça de fusão durante a soldagem.

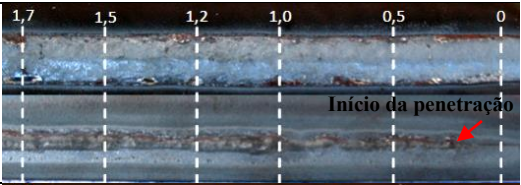
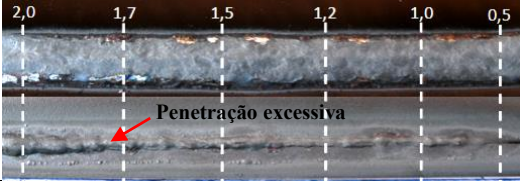
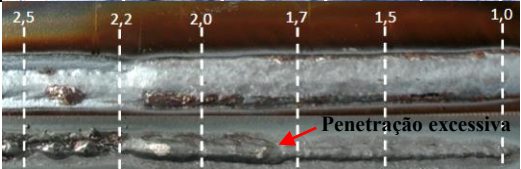
Pt	Δf (mm)	F_{\min} (mm)	F_{\max} (mm)	I_m (A)	Aspecto da face (vista de cima) e raiz (vista de baixo)
1	0 – 1,7	0,2	1,7	149	
2	0,5 – 2,0	0,5	1,7	147	
3	1,0 – 2,5	1,0	1,7	147	

Figura 5.2 – Comportamento do cordão (face e raiz) produzido em junta de topo (preparação em I) de aço ao carbono sobre folga variável, sem a aplicação da técnica switchback, onde Pt significa placa de teste, Δf é a variação entre as folgas consideradas (Figura 5.1), F_{\min} o valor mínimo da folga em que houve cordão, F_{\max} o valor máximo da folga em que houve cordão

Para observar a repetitividade deste comportamento inadequado da raiz acima de 1,7 mm, replicagem da soldagem foram produzidas. O aspecto destes novos cordões é visualizado na Figura 5.3. Percebe-se nessa figura que a penetração teve um comportamento não uniforme quando a folga variou de 0,5 mm a 2,0 mm (placa de teste 4). Neste caso, foi verificada a penetração excessiva mesmo antes de 1,7 mm (no início e meio do cordão). Quando a folga variou de 1,0 até 2,5 mm (paca de teste 5), ela manteve-se regular até 2,0 mm, quando passou a ser excessiva. Novamente, a partir de uma folga de 2,2 mm, observou-se o vazamento da raiz. Desta forma, a soldagem MIG/MAG sem o emprego da técnica tolerou uma variação da folga de aproximadamente 0,2 a 2,0 mm.

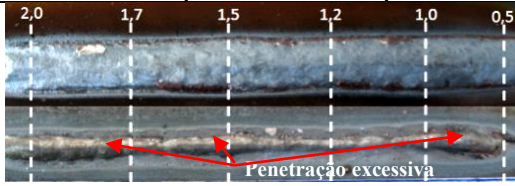
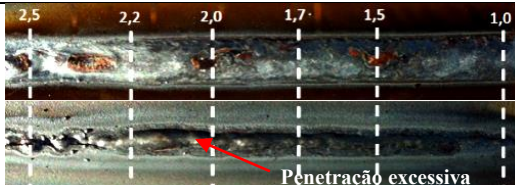
Pt	Δf (mm)	F_{\min} (mm)	F_{\max} (mm)	I_m (A)	Aspecto da face (vista de cima) e raiz (vista de baixo)
4	0,5 – 2,0	0,5	1,7	147	
5	1,0 – 2,5	1,0	2,0	148	

Figura 5.3 – Comportamento da replicagem dos cordões (face e raiz) produzidos anteriormente em junta de topo sobre uma folga variável em junta de topo (preparação em I) de aço ao carbono sobre folga variável, sem a aplicação da técnica switchback, onde Pt significa placa de teste, Δf é a variação entre as folgas consideradas (Figura 5.1), F_{\min} o valor mínimo da folga em que houve cordão, F_{\max} o valor máximo da folga em que houve cordão

5.3 Comportamento da penetração dos cordões produzidos com o emprego da técnica

A Figura 5.4 apresenta o comportamento da raiz dos cordões produzidos com a técnica switchback, com a seguinte parametrização:

- velocidade equivalente = 28 cm/min
- comprimento de avanço = 10 mm
- comprimento de reversão = 5 mm;
- velocidade de avanço = 74 cm/min
- velocidade de reversão = 74 cm/min

Esta análise da raiz foi realizada com 4 placas de teste com variação de folga escalonda, de 0 mm a 1,7 mm (placa de teste 6), de 0,5 mm a 2,0 mm (placa de teste 7), de 1,0 mm a 2,5 mm (placa de teste 8) e de 1,5 mm a 3,0 mm (placa de teste 9), cobrindo uma variação total da folga de 0 mm até 3,0 mm. Por intermédio dessa figura, percebe-se que a penetração das soldas produzidas com a técnica passou a ser uniforme a partir de, aproximadamente, 1,1 mm de folga (placa de teste 6) e manteve-se regular até os 3,0 mm de folga avaliados (placa de teste 9). Entretanto, nestas soldas, foi observada falta de penetração intermitente da raiz, ou seja, uma raiz irregular com periódicos cumes (penetração um pouco além da raiz) e vales (penetração um pouco aquém da raiz). A

ocorrência da falta de penetração reduziu o comprimento útil do cordão para uma variação da folga de 1,4 mm (valor médio obtido entre as folgas mínimas observadas) a 3,0 mm. Esta descontinuidade não foi verificada nas soldagens sem a técnica.

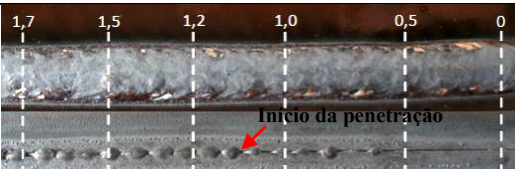

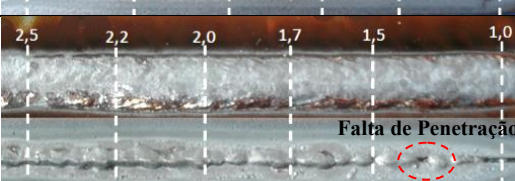
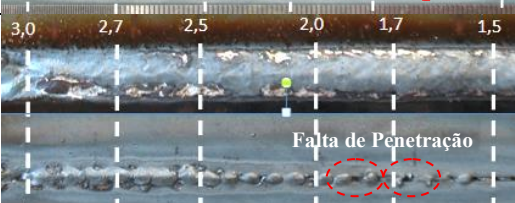
Pt	Δf (mm)	F_{\min} (mm)	F_{\max} (mm)	I_m (A)	Aspecto da face (vista de cima) e raiz (vista de baixo)
6	0 – 1,7	1,0	1,7	149	 A top-down view of a weld joint with a scale from 1,7 to 0 mm. A red arrow points to the 'Início da penetração' (start of penetration) at approximately 1,2 mm.
7	0,5 – 2,0	1,2	2,0	147	 A top-down view of a weld joint with a scale from 2,0 to 0,5 mm. A red circle highlights a 'Falta de Penetração' (lack of penetration) at approximately 1,2 mm.
8	1,0 – 2,5	1,3	2,5	147	 A top-down view of a weld joint with a scale from 2,5 to 1,0 mm. A red circle highlights a 'Falta de Penetração' (lack of penetration) at approximately 1,5 mm.
9	1,5 – 3,0	1,8	3,0	145	 A top-down view of a weld joint with a scale from 3,0 to 1,5 mm. Two red circles highlight 'Falta de Penetração' (lack of penetration) at approximately 2,0 mm and 1,7 mm.

Figura 5.4 – Comportamento do cordão (face e raiz) produzido em junta de topo (preparação em I) de aço ao carbono sobre folga variável, com a aplicação da técnica switchback, onde Pt significa placa de teste, Δf é a variação entre as folgas consideradas (Figura 5.1), F_{\min} o valor mínimo da folga em que houve cordão, F_{\max} o valor máximo da folga em que houve cordão

O resultado da replicagem destas soldas estão apresentadas na Figura 5.5. Apenas não foi realizada a replicagem daquela solda produzida com folga de 0 mm a 1,7 mm, pois o interessante foi observar o comportamento da penetração para as maiores variações da folga, consideradas as condições mais críticas. A Figura 5.5 indica que, para uma variação da folga de 0,5 mm a 2,0 mm (placa de teste 10), houve uma penetração excessiva próxima à folga de 1,7 mm. Porém, esta penetração excessiva não foi observada quando a folga variou de 1,0 mm até 2,5 mm (placa de teste 11) e, também, de 1,5 mm até 3,0 mm (placa de teste 12) mostrando que o emprego da técnica manteve um maior controle do tamanho da raiz da solda. Durante a análise da raiz nas replicagem produzidas, mais uma vez notou-se falta de penetração, indicando a falta de robustez da técnica. Assim, novamente a sua

ocorrência reduziu o comprimento útil do cordão para, neste caso, uma variação da folga de 1,5 mm (valor médio obtido entre as folgas mínimas observadas) a 3,0 mm.

Pt	Δf (mm)	F_{\min} (mm)	F_{\max} (mm)	I_m (A)	Aspecto da face (vista de cima) e raiz (vista de baixo)
10	0,5 – 2,0	0,7	1,7	147	
11	1,0 – 2,5	1,7	2,5	147	
12	1,5 – 3,0	2,0	3,0	144	

Figura 5.5 – Comportamento da replicagem dos cordões (face e raiz) produzidos anteriormente em junta de topo sobre uma folga variável em junta de topo (preparação em I) de aço ao carbono sobre folga variável, com a aplicação da técnica switchback, onde Pt significa placa de teste, Δf é a variação entre as folgas consideradas (Figura 5.1), F_{\min} o valor mínimo da folga em que houve cordão, F_{\max} o valor máximo da folga em que houve cordão

Para aumentar a robustez foi feito mudanças nos parâmetros da técnica switchback, mantendo constante a velocidade equivalente em 28 cm/min:

- comprimento de avanço = 30 mm
- comprimento de reversão = 20 mm;
- velocidade de avanço = 111 cm/min
- velocidade de reversão = 111 cm/min

A Figura 5.6 apresenta o aspecto da raiz dos cordões produzidos com os novos parâmetros da técnica switchback, para uma variação total da folga de 1,7 mm a 3,7 mm. Para esta condição da técnica, a penetração da solda somente passou a ser regular a partir de uma folga igual a 1,7 mm (para menores aberturas, não houve penetração total) e manteve sua regularidade até, aproximadamente, 3,2mm de abertura de raiz. Acima desta abertura, ocorreu a perfuração da raiz. O mesmo resultado foi observado na replicagem

produzida (figura 5.7), ou seja, a penetração manteve uniforme desde uma folga de 1,7 mm até 3,2 mm, com exceção das placas de teste 14 e 16 nas quais a penetração manteve-se regular até 3,0 mm.

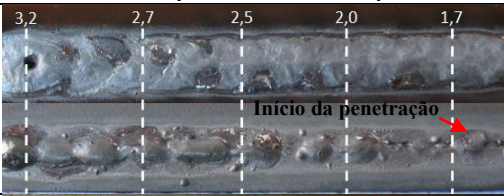
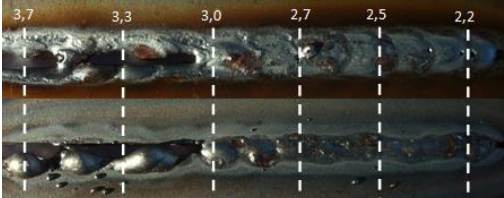
Pt	Δf (mm)	F_{\min} (mm)	F_{\max} (mm)	I_m (A)	Aspecto da face (vista de cima) e raiz (vista de baixo)
13	1,7 – 3,2	1,6	3,2	146	
14	2,2 – 3,7	2,2	3,0	148	

Figura 5.6 – Comportamento do cordão (face e raiz) produzido em junta de topo (preparação em I) de aço ao carbono sobre folga variável, com a aplicação da técnica switchback, onde Pt significa placa de teste, Δf é a variação entre as folgas consideradas (Figura 5.1), F_{\min} o valor mínimo da folga em que houve cordão, F_{\max} o valor máximo da folga em que houve cordão

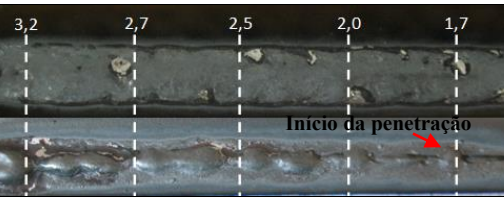
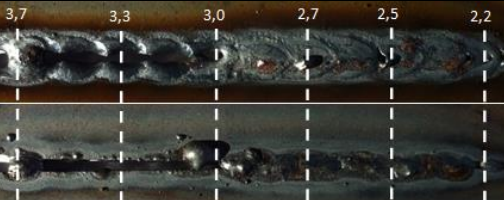
Pt	Δf (mm)	F_{\min} (mm)	F_{\max} (mm)	I_m (A)	Aspecto da face (vista de cima) e raiz (vista de baixo)
15	1,7 – 3,2	1,7	3,2	146	
16	2,2 – 3,7	2,2	3,0	145	

Figura 5.7 – Comportamento da replicagem dos cordões (face e raiz) produzidos anteriormente em junta de topo sobre uma folga variável em junta de topo (preparação em I) de aço ao carbono sobre folga variável, com a aplicação da técnica switchback, onde Pt significa placa de teste, Δf é a variação entre as folgas consideradas (Figura 5.1), F_{\min} o valor mínimo da folga em que houve cordão, F_{\max} o valor máximo da folga em que houve cordão

Os resultados obtidos mostram que a soldagem MIG/MAG com o emprego da técnica permitiu a produção de soldas com estabilidade da raiz até uma abertura máxima da folga igual a 3,2 mm. Sem o emprego da técnica, a estabilidade da raiz foi conseguida até uma abertura de 2,0 mm. Mas, deve ser ressaltado que, para pequenas folgas (menores que 2,0 mm, com a reversão de 5 mm) pode ocorrer a falta de penetração. Deve-se lembrar que a técnica switchback torna o cordão mais frio, justificando menor penetração em juntas mais estreitas. Isto pode ser visualizado por intermédio da Figura 5.8, isto é, quando a técnica não foi empregada, a soldagem MIG/MAG tolerou uma variação da folga de 0,2 mm a 2,0 mm. Já com o seu emprego, a soldagem MIG/MAG passou a suportar uma variação média de 1,4 mm a 3,0 mm, com a reversão de 5 mm, e 1,6 mm a 3,2 mm, com a reversão de 20 mm. Para tentar eliminar ou minimizar a falta de penetração observada, buscou-se realizar novos experimentos, onde procurou-se modificar a velocidade da tocha durante os percursos de avanço e recuo.

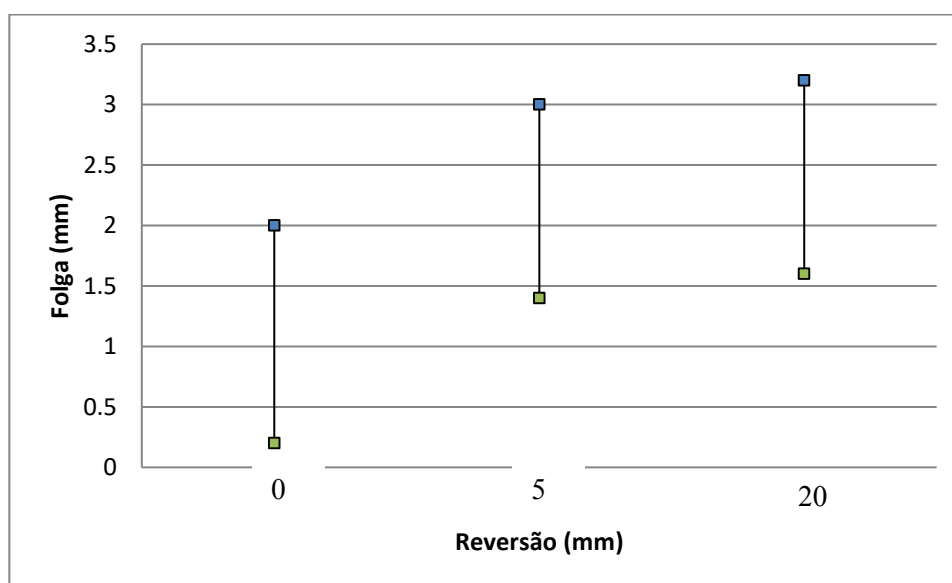


Figura 5.8 – Tolerância da folga para a soldagem MIG/MAG-P de juntas de topo, sem o emprego da técnica Switchback (0 mm de reversão) e com o emprego da técnica (5 e 20 mm de reversão)

5.4 Efeito da mudança da velocidade da tocha

5.4.1 Redução da velocidade de avanço

Para tentar eliminar ou reduzir o problema da falta de penetração dos cordões produzidos com a técnica, a velocidade da tocha foi alterada. Para manter a velocidade equivalente de soldagem em 28 cm/min, a velocidade de avanço foi reduzida e, ao mesmo tempo, a velocidade de recuo foi aumentada. Objetivou-se aumentar a penetração no avanço. Foram realizados três cordões, o primeiro com a velocidade de avanço igual a 60% da velocidade de recuo, o segundo com velocidade de avanço de 30% da de recuo e, finalmente, o terceiro com a velocidade de avanço igual a 13% da de recuo. A condição operacional da técnica switchback avaliada foi aquela com 5 mm de comprimento de reversão, em função da maior tolerância a variação da folga (vide figura 5.8) e a raiz da solda produzida nesta condição ter apresentado falta de penetração em alguns trechos ao longo do cordão.

Para esta análise, permaneceu constante a variação da folga de 1,0 mm até 2,5 mm. Esta faixa foi escolhida por dois motivos. O primeiro porque quando foram produzidos os primeiros cordões com a reversão de 5 mm (vide Figura 5.4 – placas de teste 6 , 7 - e Figura 5.5 – placa de teste 10) verificou-se que a penetração iniciou com uma folga aproximada de 1,0 mm. Segundo, quando foram realizados os cordões com a referida variação da folga (1,0 mm a 2,5 mm), a penetração não iniciou mais em 1,0 mm (vide Figura 5.4– placas de teste 8 - e Figura 5.5 – placa de teste 11). Então, esta faixa passou a ser considerada crítica e foi adotada para avaliar o efeito da mudança da velocidade da tocha, no intuito de verificar a melhora da penetração neste trecho com folga próxima a 1,0 mm.

A Figura 5.9 apresenta o aspecto das superfícies e raízes dos cordões produzidos. Observa-se nesta figura que uma falta de penetração esporádica continuou sendo observada na raiz do cordão (entre 1,5 mm e 1,7 mm de folga) mesmo quando a velocidade de avanço da tocha foi reduzida em cerca de 60% da velocidade de recuo. Já quando a velocidade de avanço passou para 30% ou 13% da velocidade de recuo, esta descontinuidade não apareceu mais. Deve ser ressaltado que a penetração do cordão melhorou para menores variações da folga, ou seja, próxima de 1,0 mm, quando a velocidade de avanço foi reduzida. Além disso, no geral, estas soldas tiveram um bom comportamento da raiz para uma variação de 1,0 mm até 2,5 mm.

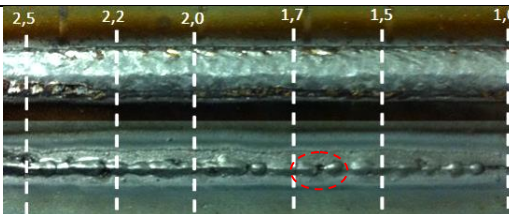
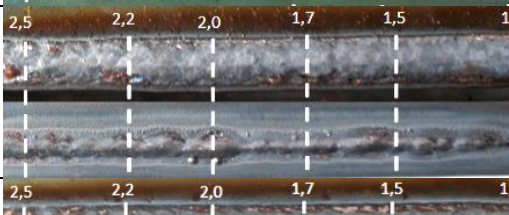
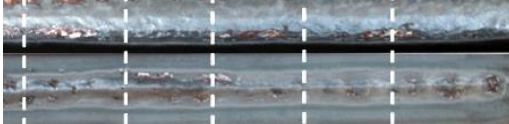
Pt	Im (A)	Va (cm/min)	Vr (cm/min)	Aspecto da face (vista de cima) e raiz (vista de baixo)
17	144	68	108	
		$(Va=0,6Vr)$		
18	144	61	155	
		$(Va=0,3Vr)$		
19	145	54	424	
		$(Va=0,13Vr)$		

Figura 5.9 – Comportamento do cordão (face e raiz) produzido em junta de topo (preparação em I) de aço ao carbono sobre uma folga variável de 1,0 mm a 2,5 mm, com a redução da velocidade de avanço da tocha (reversão de 5 mm), onde Pt significa placa de teste, Im é a corrente média, Va é a velocidade de avanço, Vr é a velocidade de reversão

Estas duas últimas soldas produzidas que não apresentaram falta de penetração ao longo da junta foram replicadas. O resultado obtido para a face e raiz são observados na Figura 5.10. Nota-se nesta figura que se voltou a observar a falta de penetração para uma velocidade de avanço igual a 30%. Já a solda produzida com uma velocidade de avanço igual a 13% novamente apresentou-se com penetração total, dentro do trecho de folga avaliado. Estes resultados mostraram que é possível reduzir a falta de penetração a partir da redução da velocidade de avanço da tocha. Além disso, conseguiu-se melhorar a falta de penetração para folgas próximas a 1,0 mm de abertura. Desta maneira, a tolerância a variação da folga pode ser aumentada (vide figura 5.11), ou seja, para a variação da folga de 1,0 mm a 2,5 mm, o processo MIG/MAG tolerou uma variação de 1 mm a 2,5 mm com o emprego da técnica em uma velocidade de avanço menor cerca de 13% que a velocidade de reversão (vide placas de teste 19 e 21), maior que aquela alcançada de 1,4 mm a 3,0 mm, quando a velocidade de avanço foi igual a de recuo (vide placas de teste 9 e 12).

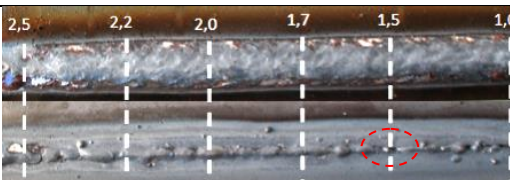
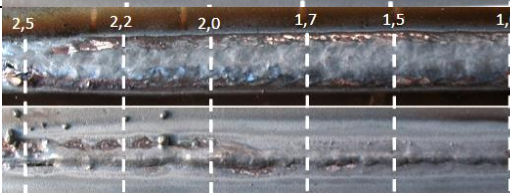
Pt	Im (A)	Va (cm/min)	Vr (cm/min)	Aspecto da face (vista de cima) e raiz (vista de baixo)					
20	148	61	155						
		(Va=0,3Vr)							
21	146	54	424						
		(Va=0,13Vr)							

Figura 5.10 – Comportamento das réplicas dos cordões produzidos anteriormente sobre uma folga variável de 1,0 mm a 2,5 mm, com a redução da velocidade de avanço da tocha (reversão de 5 mm), onde Pt significa placa de teste, Im é a corrente média, Va é a velocidade de avanço, Vr é a velocidade de reversão

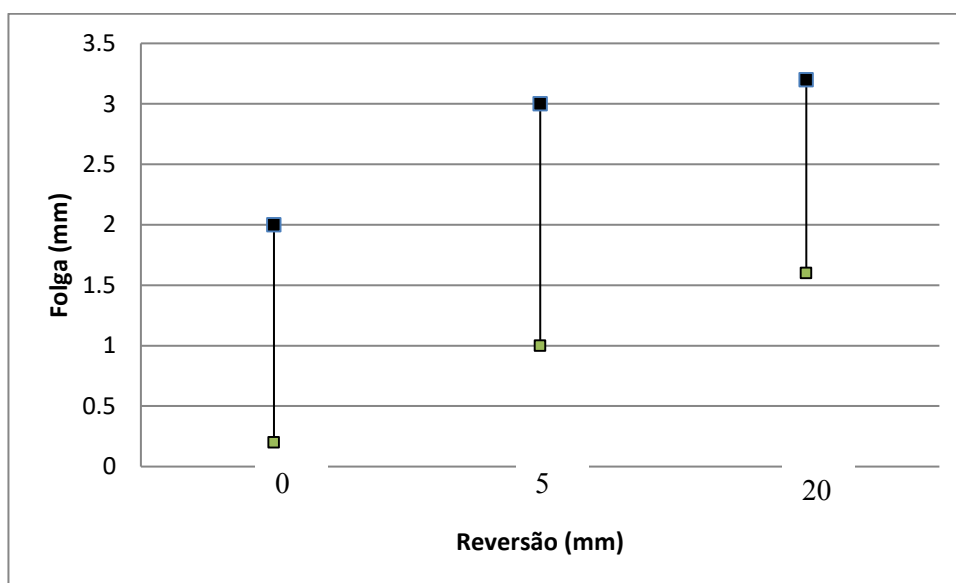


Figura 5.11 – Tolerância da folga para a soldagem MIG/MAG-P de juntas de topo, sem o emprego da técnica Switchback (0 mm de reversão) e com o emprego da técnica (5 e 20 mm de reversão)

Outro fato interessante pode ser observado na Figura 5.12. A solda produzida com velocidade de avanço igual a 13% da de recuo (Figura 5.12(a)) apresentou uma estrutura de solidificação do metal de solda com grãos parcialmente recristalizados, tal como ocorre no metal de solda produzido com a velocidade de avanço igual a de recuo (Figura 5.12(b)). Isto mostra que mesmo mudando a velocidade da tocha para melhorar a penetração do cordão,

o fundo do cordão ainda sofre alguma recristalização dos grãos no estado bruto de fusão. É perceptível a diferença na morfologia destes grãos produzidos com a técnica em relação aqueles produzidos sem seu o emprego (Figura 5.12(c)). Neste último caso, os grãos apresentam-se no estado bruto de fusão, com uma morfologia colunar.

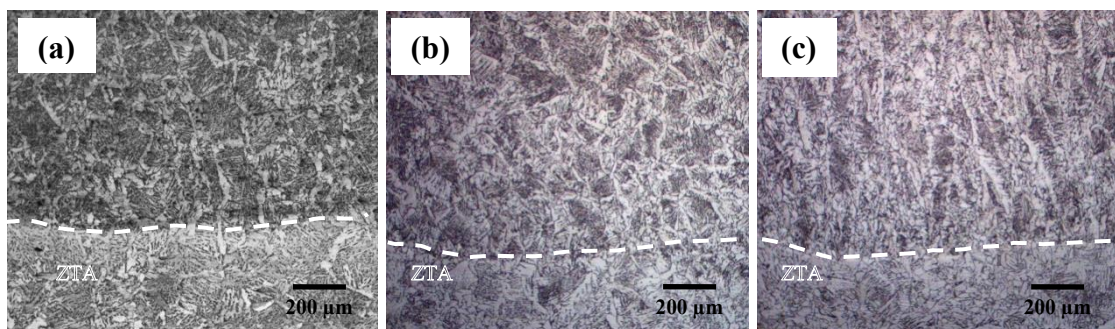


Figura 5.12 – Comparação da estrutura de solidificação obtida para os cordões produzidos: (a) com a técnica, sendo $V_a=0,13 \times V_r$; (b) com a técnica, sendo $V_a= V_r$; e (c) sem a técnica

5.4.2 Aumento da velocidade de avanço

Buscou-se analisar, também, o efeito do aumento da velocidade de avanço em relação a velocidade de recuo, para uma mesma velocidade equivalente de soldagem de 28 cm/min. A velocidade da tocha durante o avanço foi aumentada em 2 e 3 vezes a de recuo. Os resultados obtidos para os cordões produzidos são observados na Figura 5.13. Verifica-se que com o aumento da velocidade da tocha durante o avanço, a penetração do cordão diminui e ocorre a falta de penetração para trechos com menor folga. Em síntese, o efeito da mudança da velocidade da tocha sobre comportamento da raiz do cordão pode ser visualizado na Figura 5.14. É perceptível a melhora da estabilidade da raiz com a redução da velocidade de avanço. Este resultado difere da literatura, onde observa-se que o controle da raiz é conseguido com uma alta velocidade de avanço, seguida de uma baixa velocidade no recuo da tocha.

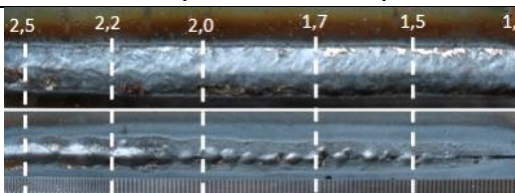
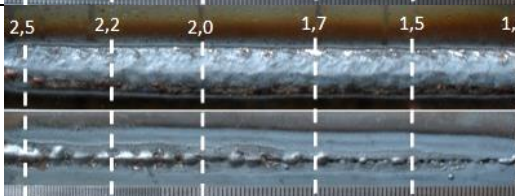
Pt	Im (A)	Va (cm/min)	Vr (cm/min)	Aspecto da face (vista de cima) e raiz (vista de baixo)					
22	146	106	53						
		(Va=2Vr)							
23	145	132	44						
		(Va=3Vr)							

Figura 5.13 – Comportamento do cordão (face e raiz) produzido em junta de topo (preparação em I) de aço ao carbono sobre uma folga variável de 1,0 mm a 2,5 mm, com o aumento da velocidade de avanço da tocha (reversão de 5 mm), onde Pt significa placa de teste, Im é a corrente média, Va é a velocidade de avanço, Vr é a velocidade de reversão

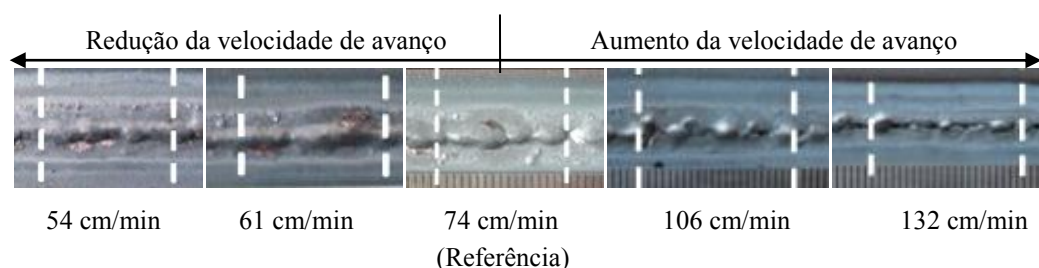


Figura 5.14 – Comportamento da penetração para diferentes valores da velocidade de avanço da tocha (reversão de 5 mm)

5.4.3 Mudança da velocidade equivalente (efeito da energia de soldagem)

Outra maneira de tentar minimizar o problema da falta de fusão nos trechos com menor folga foi a de reduzir a velocidade equivalente de soldagem, ou seja, aumentar a energia de soldagem, reduzindo-se progressivamente de 28 cm/min em 1 cm/min a cada solda, até encontrar a menor velocidade equivalente capaz de produzir um cordão com bom aspecto superficial e sem prejudicar a raiz. Os resultados são observados na Figura 5.15. Nota-se nessa figura que ainda ocorreu a falta de penetração quando a velocidade equivalente utilizada foi de 27 cm/min. Esta descontinuidade praticamente desapareceu quando foi empregada uma velocidade equivalente de 26 cm/min. Já para a velocidade de 25 cm/min, a alta energia inserida na junta provocou o vazamento do metal para a raiz, a partir de 1,5 mm de folga, gerando a penetração excessiva. Assim, pode-se conseguir a melhora da

penetração do cordão, em menores folgas, quando utilizou-se uma velocidade equivalente de 26 cm/min. Mas esta redução de 28 cm/min para 26 cm/min deve ser avaliada cautelosamente, pois quanto menor a velocidade de soldagem, menor será a produtividade.

A Figura 5.16 mostra uma solda produzida sem switchback e com a mesma velocidade de soldagem de 26 cm/min. Não foi possível produzir um cordão com geometria aceitável. Mas vale ressaltar que o interessante seria produzir um cordão com a maior velocidade de soldagem possível (velocidade limite de soldagem). Se com 26 cm/min e 28 cm/min não foi possível produzir um cordão com geometria aceitável sem switchback, isto poderia ser conseguido com uma velocidade maior.

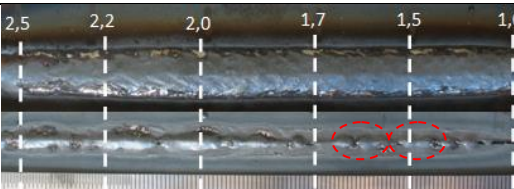

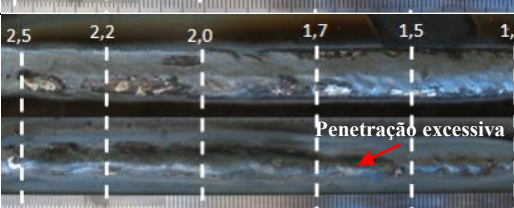
Pt	Im (A)	Va (cm/min)	Vr (cm/min)	Aspecto da face (vista de cima) e raiz (vista de baixo)					
24	143	77	77						
		(Veq=27)							
25	147	74	74						
		(Veq=26)							
26	150	71	71						
		(Veq=25)							

Figura 5.15 – Comportamento do cordão (face e raiz) produzido em junta de topo (preparação em I) de aço ao carbono sobre uma folga variável de 1,0 mm a 2,5 mm, com a redução da velocidade equivalente de soldagem (reversão de 5 mm), onde Ptsignifica placa de teste, Im é a corrente média, Va é a velocidade de avanço, Vr é a velocidade de reversão

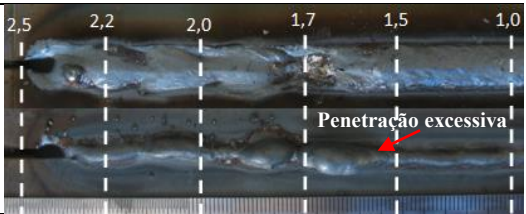
Pt	Im (A)	Va (cm/min)	Vr (cm/min)	Aspecto da face (vista de cima) e raiz (vista de baixo)
27	150	----- ($V_s=26$)	-----	

Figura 5.16 – Comportamento do cordão (face e raiz) produzido em junta de topo (preparação em I) de aço ao carbono sobre uma folga variável de 1,0 mm a 2,5 mm, sem a aplicação da técnica Switchback (reversão de 5 mm), onde Pt significa placa de teste, Im é a corrente média, Va é a velocidade de avanço, Vr é a velocidade de reversão

5.4.4 Efeito da mudança do comprimento da reversão

Finalmente, procurou-se observar o efeito da mudança do comprimento da reversão no controle da raiz do cordão. As análises, até então, tinham sido realizadas com uma reversão de 5 mm. Então, a reversão foi modificada para 6 mm. A ideia foi fazer com que a tocha recuasse mais do que a metade do comprimento de avanço para tentar minimizar a falta de penetração. O resultado pode ser observado na Figura 5.17. Verifica-se nessa figura que com uma velocidade equivalente de soldagem de 28 cm/min não houve a melhora da falta de penetração. Este problema persistiu mesmo com a redução desta velocidade para 26 cm/min. Acredita-se que esta dificuldade em conseguir penetração total ao longo da junta esteja relacionado com os altos valores da velocidade de avanço da tocha. Como foi verificado anteriormente, a penetração melhora com a redução da velocidade de avanço e piora para velocidades de avanço cada vez maiores. Nestes dois casos de soldagem, a velocidade de avanço foi de, respectivamente, 117 cm/min e 109 cm/min, para uma velocidade equivalente de 28 cm/min e 26 cm/min.

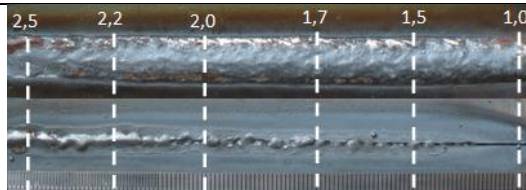
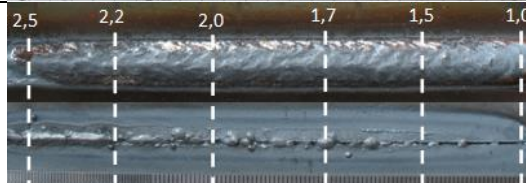
Pt	Im (A)	Va (cm/min)	Vr (cm/min)	Aspecto da face (vista de cima) e raiz (vista de baixo)					
28	146	117	117						
		(Veq=28)							
29	145	109	109						
		(Veq=26)							

Figura 5.17 – Comportamento do cordão (face e raiz) produzido em junta de topo (preparação em I) de aço ao carbono sobre uma folga variável de 1,0 mm a 2,5 mm, com reversão de 6 mm, em diferentes velocidades equivalente de soldagem), onde Pt significa placa de teste, Im é a corrente média, Va é a velocidade de avanço, Vr é a velocidade de reversão

5.5 Conclusão

A técnica switchback permitiu aumentar a robustez do processo MIG Pulsado no controle da penetração do cordão. Isso foi possível quando a velocidade de avanço foi menor que a velocidade de reversão, cerca de 13%. Também se consegue maior robustez com a redução da velocidade equivalente de soldagem, porém isto implica em redução no tempo de fabricação. A melhor condição de relação avanço-reversão foi 10-5.

CAPÍTULO VI

Avaliação da Técnica Switchback Visando Aumento da Velocidade Limite de Soldagem

6.1 Introdução

Este capítulo faz um estudo sobre o potencial da técnica switchback em fazer aumentar a velocidade limite do processo de soldagem MIG/MAG. Trabalhos anteriores (Bruecker, 2007) realizados com essa técnica no Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem (LAPROSOLDA) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) mostraram que a velocidade limite da soldagem MIG/MAG em corrente pulsada pode ser aumentada em até 60%, aumentando a produtividade do processo. Assim, o presente estudo vem procurar confirmar este potencial da técnica, muito importante para a indústria do setor metal mecânico. Serão apresentadas metodologias para alcançar o aumento desta velocidade limite, bem como as variáveis da técnica que influenciam neste aumento e de que forma podem ser manipuladas com este fim.

6.2 Procedimento experimental

Para este estudo, os experimentos foram realizados com o processo MIG/MAG em corrente pulsada, soldando-se juntas sobrepostas de aço carbono com 1 mm de folga. As dimensões desta junta (junta sobreposta) estão ilustradas na Figura 6.1. Esta foi a mesma configuração da junta usada por Bruecker (2007), quando também foi avaliado o potencial da técnica para aumentar a velocidade limite. As placas de teste foram fabricadas a partir de barras chatas de aço carbono com 3,3 mm de espessura. Elas foram cortadas em um comprimento de 180 mm, depois limpas com jateamento de partículas abrasivas de óxido de alumínio e, finalmente, ponteadas com o processo eletrodo revestido. Do ponto de vista

da soldagem, foram mantidos constantes a alimentação do arame em 4,0 m/min, a corrente média em 150 A, a mistura gasosa Ar + 5% O₂ e sua vazão em 15 l/min, a DBCP em 18 mm e os parâmetros de corrente pulsada (os mesmos da tabela 3.2 do capítulo 3). O ângulo de trabalho da tocha foi de 45° e o ângulo de ataque da tocha foi de +15°, ou seja, adotou-se o deslocamento da tocha no sentido empurrando-puxando. A velocidade de soldagem foi variada em escalões de 10 cm/min, a partir de 25 cm/min. A cada soldagem foi observado a aparência superficial do cordão com a finalidade de detectar descontinuidades ao longo do cordão. A seção transversal da solda foi observada apenas nas condições de velocidade limite. Ela foi retirada da região central do cordão, preparada superficialmente com o procedimento de lixamento (até 600 mesh) e, em seguida, atacada com Nital 10%.

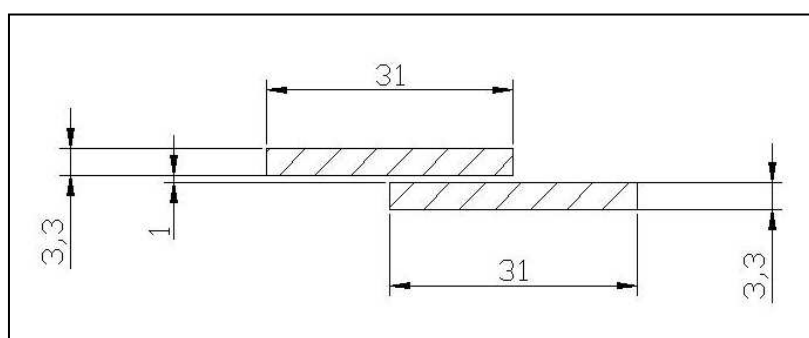


Figura 6.1 – Desenho ilustrativo da junta sobreposta, unidade em mm

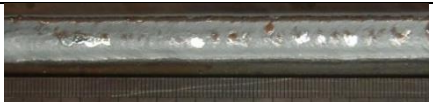



6.3 Verificação do potencial da técnica no aumento da velocidade limite de soldagem

Inicialmente, foram realizadas as soldagens das juntas sobrepostas de aço carbono sem o emprego da técnica switchback. Imagens dos cordões produzidos são apresentadas na Tabela 6.1. Nota-se que foi possível a soldagem com até 35 cm/min. A partir de 45 cm/min, as soldas apresentaram comprimentos de perna muito diferentes, em função do metal líquido solidificar preferencialmente mais para um lado das arestas da junta. Isto foi muito mais perceptível na soldagem com 55 cm/min, como indica a Figura 6.2. Este resultado corrobora aquele obtido por Bruecker (2007), pois também foi conseguida uma velocidade máxima de soldagem de 35 cm/min, quando não foi empregada a técnica switchback nas soldagens de juntas sobrepostas de aço-carbono com 3 mm de espessura e com uma folga de 1 mm.

Em seguida, foram produzidas as soldagens das juntas com a técnica switchback. Foi utilizada uma relação avanço-reversão constante e igual a 10-5 mm. A tabela 6.2 apresenta o aspecto destes cordões produzidos, até uma velocidade de soldagem de 75 cm/min. Foi possível a soldagem da junta até uma velocidade de 55 cm/min, pois acima desta

velocidade os cordões apresentaram uma geometria bastante irregular. Entretanto, mesmo com a velocidade de 55 cm/min, a geometria do cordão apresentou um aspecto geométrico pouco regular, com variações no reforço e largura. Os perfis das seções transversais das soldas produzidas com switchback também estão apresentados na Figura 6.2. Verifica-se nesta figura que o aumento da velocidade de soldagem até 55 cm/min não alterou de forma significativa o perfil dos cordões, como aconteceu no caso quando não foi utilizada a técnica. Isto é um indício de robustez do processo MIG/MAG quando a técnica switchback é empregada.


Tabela 6.1 – Influência da velocidade equivalente de soldagem sobre o aspecto superficial dos cordões produzidos sem a técnica switchback

Velocidade Equivalente (cm/min)	Corrente (A)	Aspecto do cordão
25	145	
35	145	
45	144	
55	146	

Pode ainda ser observado na Tabela 6.2 que os tempos em que a tocha permanece no avanço e reversão reduzem com o aumento da velocidade equivalente de soldagem. Isto ocorre em função da necessidade de se aumentar a velocidade da tocha para fazer a solda em tempos de soldagem cada vez menores. Estes menores tempos certamente estão contribuindo para prejudicar a qualidade superficial dos cordões produzidos em alta velocidade de soldagem.

Assim, dentro da faixa de velocidade de soldagem avaliada (até 75 cm/min), a técnica switchback permitiu aumentar a velocidade limite na soldagem de juntas sobrepostas de aço carbono com o processo MIG/MAG. Porém, existe a necessidade de melhorar a geometria do cordão produzido com altas velocidades de soldagem, quando a técnica é empregada.

Tabela 6.2 – Aspecto superficial dos cordões produzidos com a técnica switchback , com o aumento da velocidade de soldagem, para uma relação avanço-reversão constante 10-5

Velocid. Equival. de soldagem (cm/min)	Velocid. da tocha (cm/min)	Tempo (s)		Corrente (A)	Aspecto do cordão
		Ava.	Rev.		
25	74	0,81	0,41	145	
35	103	0,58	0,29	146	
45	132	0,45	0,23	146	
55	163	0,35	0,18	146	
65	192	0,32	0,16	145	
75	214	0,28	0,14	146	

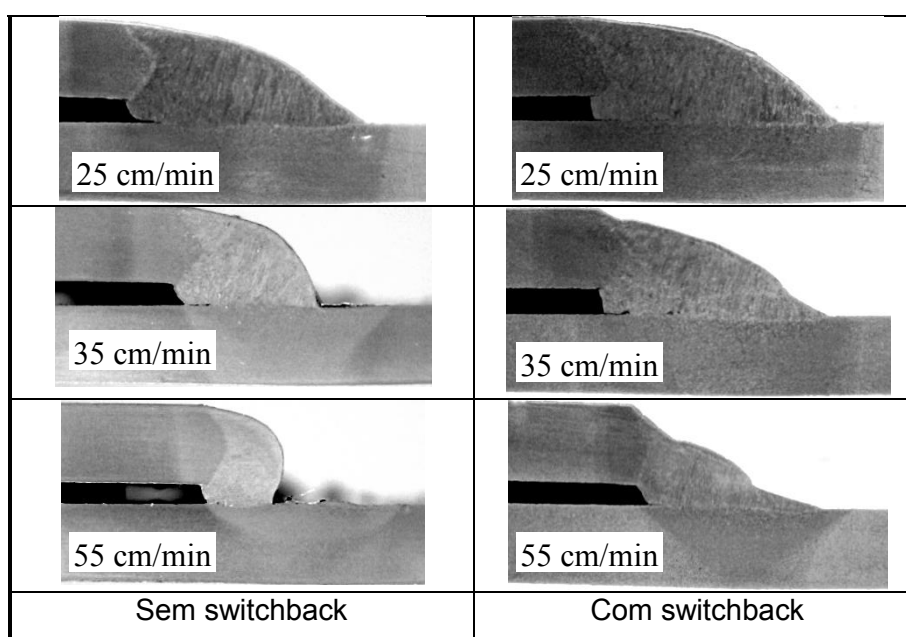


Figura 6.2 – Influência da velocidade equivalente de soldagem sobre o perfil dos cordões produzidos sem e com a técnica switchback

6.3.1 Análise da equivalência de tempo

Para tentar melhorar o aspecto dos cordões produzidos em alta velocidade com a técnica switchback, a metodologia inicial adotada foi manter constantes os tempos de avanço e de reversão da tocha (equivalência de tempos) com o aumento da velocidade de soldagem. Isto porque foi observado anteriormente que estes tempos reduzem com o aumento da velocidade de soldagem e, certamente, são insuficientes para o preenchimento da junta de forma adequada, formando as irregularidades geométricas ao longo do cordão. Mas, para que eles permanecessem os mesmos, os comprimentos de avanço e reversão devem ser modificados para uma dada velocidade de soldagem. Desta maneira, foi necessário encontrar equações que permitissem estabelecer novos valores para estes comprimentos, mantendo a equivalência de tempos.

a) Cálculo da velocidade da tocha para uma dada velocidade equivalente de soldagem

A velocidade equivalente de soldagem pode ser definida por:

$$V_{eq} = \frac{\text{Comprimento do cordão}}{\text{tempo de soldagem}} \quad (6.1)$$

A velocidade da tocha empregada com o switchback é dada por:

$$V_{tocha} = \frac{\text{comprimento percorrido pela tocha}}{\text{tempo de soldagem}} \quad (6.2)$$

$$V_{tocha} = \frac{mC_a + nC_r}{\text{tempo de soldagem}} \quad (6.3)$$

onde C_a é o comprimento do avanço, C_r é o comprimento da reversão, m é a quantidade de vezes que ocorre o avanço e n é a quantidade de vezes que ocorre a reversão ($n=m-1$), então:

$$V_{tocha} = \frac{mC_a + (m-1)C_r}{\text{tempo de soldagem}} \quad (6.4)$$

Combinando a equação (6.4) com a (6.1), tem-se:

$$V_{tocha} = \frac{(mC_a + (m-1)C_r)V_{eq}}{\text{comprimento do cordão}} \quad (6.5)$$

Vale lembrar que m e n estão ligados com o comprimento do cordão (o qual foi sempre constante e igual a 140 mm em todos os experimentos). Assim, para uma solda produzida com um comprimento de 140 mm e uma condição da relação avanço reversão igual a 10-5

(avanço de 10 mm e reversão de 5 mm), serão realizados 27 avanços e 26 reversões, ou seja, $m=27$ e $n=26$.

Esta equação mostra qual deverá ser a velocidade da tocha para uma dada velocidade equivalente de soldagem, conhecendo-se os comprimentos de avanço e reversão. A Tabela 6.3 mostra diversos valores da velocidade da tocha para diferentes velocidades equivalente.

Tabela 6.3 – Velocidade da tocha em função da velocidade equivalente de soldagem, para uma relação avanço-reversão de 10-5

Vel. Eq. (cm/min)	Comp. Cordão (mm)	m	Ca (mm)	n	Cr (mm)	Vtocha (cm/min)
25	140	27	10	26	5	71
35	140	27	10	26	5	100
45	140	27	10	26	5	129
55	140	27	10	26	5	157
65	140	27	10	26	5	186

Obs: C_a é o comprimento do avanço, C_r é o comprimento da reversão, m é a quantidade de vezes que ocorre o avanço e n é a quantidade de vezes que ocorre a reversão ($n=m-1$)

Mas pode-se também descrever a velocidade equivalente por:

$$V_{eq} = \frac{\text{comprimento do cordão} \cdot V_{tocha}}{(mC_a + (m-1)C_r)} \quad (6.6)$$

Observa-se por pela Equação 6.6 que ao se aumentar a velocidade equivalente de soldagem, a velocidade da tocha também aumenta. Consequentemente, os tempos em que a tocha realiza o avanço e a reversão também diminuem.

b) Cálculo dos novos comprimentos de avanço e reversão para manter a equivalência de tempos

Os tempos de avanço e reversão são dados por:

$$t_{avanço} = \frac{C_a}{V_{tocha}} \quad (6.7)$$

$$t_{reversão} = \frac{C_r}{V_{tocha}} \quad (6.8)$$

Para utilizar as equações 6.7 e 6.8, foram escolhidos os tempos de 0,81 s e 0,41 s para o avanço e reversão, respectivamente. Estes tempos foram adotados por permitirem a

produção de um bom cordão com a velocidade equivalente de soldagem de 25 cm/min (ver Tabela 6.2). A partir da Tabela 6.3, tem-se os valores da velocidade da tocha, para uma dada velocidade equivalente de soldagem (levantados a partir da equação 6.5). Para a velocidade equivalente de 35 cm/min, a velocidade da tocha é de 100 cm/min, então, aplicando os valores de velocidade da tocha e dos tempos nas equações 6.7 e 6.8, tem-se:

Para o avanço:

$$C_a = 100 \times 0,81/60 = 1,35 \text{ cm} \sim \mathbf{14 \text{ mm}}$$

Para a reversão:

$$C_r = 100 \times 0,41/60 = 0,68 \text{ cm} \sim \mathbf{7 \text{ mm}}$$

É necessário conhecer agora o número de vezes que estes comprimentos deverão ser repetidos ao longo do comprimento do cordão (conhecer m e n). Para tal, deve-se definir a variável comprimento de avanço aparente, ou seja, o avanço que a tocha realiza durante a soldagem, sem levar em consideração a fase em que a tocha realiza a reversão, como indica a Figura 6.3.

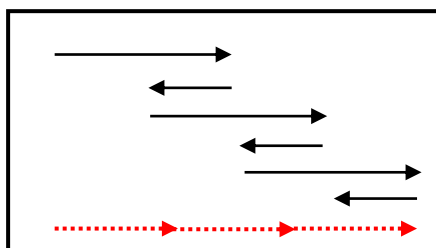


Figura 6.3 – Ilustração do avanço aparente (seta tracejada) durante a soldagem com switchback

O comprimento do avanço aparente (C_{ap}) e o número de vezes (k) que é realizado ao longo de um comprimento de 140 mm de cordão (este foi o comprimento de cordão usado e constante ao longo de todo o trabalho) são dados por:

$$C_{ap} = C_a - C_r \quad (6.9)$$

$$k = 140/C_{ap} \quad (6.10)$$

Os valores de m (número de vezes que ocorre o avanço da tocha) e n (número de vezes que ocorre a reversão da tocha) são obtidos por:

$$m = k - 1 \quad (6.11)$$

$$n = m - 1 \quad (6.12)$$

Assim, para $C_a = 14$ mm e $C_r = 7$ mm, temos $C_{ap} = 7$, $k=20$, $m=19$ e $n=18$. Logo, pode-se encontrar o novo valor da velocidade da tocha, a partir da equação 6.6.

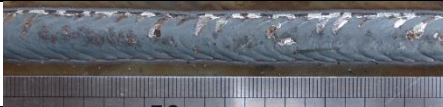
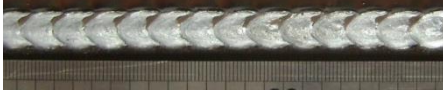


$$V_{tocha} = \frac{(19*14 + 18*7)*35}{14} = 98 \text{ cm/min} \quad (6.13)$$

Por analogia, pode-se encontrar os demais comprimentos de avanço e reversão, bem como as velocidades que devem ser empregadas na tocha, para diferentes velocidades equivalente de soldagem, mantendo a equivalência dos tempos, como indicado na Tabela 6.4. Então, após o cálculo dos novos comprimentos de avanço e reversão e, também, da velocidade da tocha (em função da equivalência de tempos) as soldagens foram realizadas. A Tabela 6.5 apresenta as imagens dos aspectos dos cordões produzidos. A equivalência dos tempos de avanço e de reversão da tocha com o aumento da velocidade de soldagem permitiu a soldagem das placas de teste até 45 cm/min (menor que no caso anterior quando foi mantida constante a relação comprimento avanço-reversão em 10-5). Com 55 cm/min, foram observadas grandes variações na geometria do cordão. Isto mostra que o tempo que leva a tocha durante as etapas de avanço e reversão não é o principal fator a ser levado em consideração quando se busca aumentar a velocidade limite de soldagem com o emprego da técnica. Os tempos de avanço e de reversão da tocha permaneceram constante em, respectivamente 0,81 s e 0,41 s. A pequena variação que ocorre nestes tempos para as soldas apresentadas acima ocorreu em função do ajuste da velocidade da tocha.

Tabela 6.4 – Valores para os comprimentos de avanço e reversão e da velocidade da tocha para manter a equivalência de tempos com o aumento da velocidade equivalente de soldagem

Veloc. Equiv.	m	Ca	n	Cr	Veloc. tocha	Tempo avanço	Tempo reversão	Cap	k
25	27	10	26	5	71	0,84	0,42	5	28
35	19	14	18	7	98	0,86	0,43	7	20
45	15	18	14	9	127	0,85	0,42	9	16
55	13	21	12	11	159	0,79	0,41	10	14
65	11	25	10	13	188	0,80	0,41	12	12

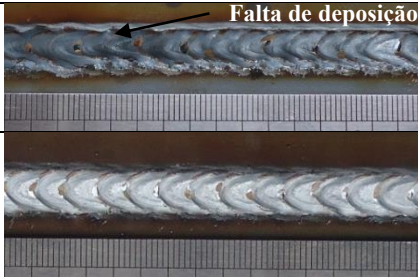
Tabela 6.5 – Aspecto superficial dos cordões produzidos com equivalência de tempos (com tempo de avanço de 0,8 e reversão de 0,4 s)

Veloc. Equival. (cm/min)	Relação avanço-reversão (mm)	Veloc. da tocha ajust. (cm/min)	Tempo (s)		Corrente (A)	Aspecto do cordão
			Ava.	Rev.		
25	10-5	74	0,81	0,41	145	
35	14-7	98	0,85	0,43	146	
45	18 -9	127	0,85	0,42	145	
55	21-11	159	0,80	0,41	145	

3.0 Efeito da sobreposição sobre a velocidade limite




Buscou-se avaliar o efeito da sobreposição da reversão sobre os cordões produzidos, a partir da velocidade de 45 cm/min (pois a partir desta velocidade, as variações na geometria dos cordões passaram a ser mais nítidas, apresentando pontos com falta de deposição de material e outros, com grandes variações da largura e do reforço). Inicialmente, foi adotada uma sobreposição de 1 mm a qual foi aplicada na condição da relação avanço-reversão 10-5, ou seja, a reversão passou de 5 mm para 6 mm. A Tabela 6.6 apresenta as imagens dos aspectos dos cordões produzidos com e sem esta sobreposição. Nota-se que o aumento do comprimento da reversão em 1 mm acarretou a obtenção de um cordão com bom aspecto superficial e com ausência de falta de deposição nas margens do cordão (observada na soldagem sem sobreposição). A boa qualidade do cordão foi observada mesmo com a redução dos tempos de avanço e reversão, em função do aumento da velocidade da tocha de 132 cm/min para 173 cm/min (para uma mesma velocidade equivalente de soldagem de 45 cm/min). Isto mostra que a sobreposição pode ter compensado o menor tempo para o depósito de material necessário para o completo preenchimento da junta.

Tabela 6.6 – Efeito da sobreposição sobre a qualidade do cordão produzido na soldagem MIG/MAG com switchback, para uma velocidade equivalente de soldagem de 45 cm/min

Sobreposição (mm)	Relação avanço-reversão (mm-mm)	Veloc. da tocha ajust. (cm/min)	Tempo (s)		Corrente (A)	Aspecto do cordão
			Ava.	Rev.		
0	10-5	132	0,45	0,23	146	
1	10-6	173	0,35	0,21	145	

Como a sobreposição de 1 mm foi satisfatória na soldagem com velocidade equivalente de 45 cm/min, outro cordão foi produzido com esta mesma sobreposição, porém agora com uma velocidade de 55 cm/min. O resultado encontrado para o aspecto superficial deste cordão é visualizado na Tabela 6.7, por onde nota-se que o aspecto superficial desse cordão ficou pior. Desta vez, a sobreposição de 1 mm parece não ter compensado o tempo insuficiente para o depósito de material na junta, durante as fases de avanço e reversão da tocha (o tempo de avanço caiu para 0,28 s e o de reversão reduziu para 0,17 s). Os menores tempos de avanço e reversão da tocha foram observados em função do aumento da velocidade da tocha para 211 cm/min (com a velocidade equivalente de 45 cm/min, a velocidade empregada na tocha foi de 173 cm/min), o que certamente dificultou a deposição de material metálico de forma regular e homogênea. Para observar se uma maior sobreposição poderia compensar este menor tempo para o depósito de material na junta, outra solda foi produzida, agora com sobreposição de 2 mm. O resultado, também indicado na Tabela 6.7, mostra que a qualidade do cordão ficou ainda pior, onde pode ser visualizada, mais claramente, a falta de material ao longo do cordão. Novamente, a sobreposição não compensou o tempo insuficiente para o preenchimento da junta. Assim, existe um limite para que a sobreposição tenha efeito positivo na qualidade do cordão com o aumento da velocidade limite. Para este estudo (quando a relação avanço-reversão é 10-5) a sobreposição foi eficaz apenas para a velocidade de 45 cm/min.

Tabela 6.7 – Efeito da sobreposição sobre a qualidade do cordão produzido na soldagem MIG/MAG com switchback, para uma velocidade equivalente de soldagem de 55 cm/min

Sobreposição (mm)	Relação avanço-reversão (mm-mm)	Veloc. da tocha ajust. (cm/min)	Tempo (s)		Corrente (A)	Aspecto do cordão
			Ava.	Rev.		
0	10-5	163	0,35	0,18	146	
1	10-6	211	0,28	0,17	145	
2	10-7	350	0,15	0,10	145	

Então, visando melhorar a qualidade do cordão, buscou-se realizar novas soldas levando-se em consideração a sobreposição, mas também buscando aumentar os tempos de avanço e de reversão. Assim, foram encontradas diversas condições para a relação avanço-reversão que garantissem a produção de soldas com tempos de avanço e reversão superiores a, respectivamente, 0,35 s e 0,21 s. Estes tempos limites foram adotados pois permitiram a produção de um bom cordão com velocidade equivalente de 45 cm/min (ver Tabela 6.6). Esse cordão foi produzido com uma velocidade da tocha de 173 cm/min, a qual também foi adotada como limite máximo para a velocidade. A Figura 6.4 mostra algumas destas condições operacionais da técnica switchback. Observa-se na Figura 6.4(a) que as condições da relação avanço-reversão que apresentaram tempos acima dos limites indicados foram: 14-8; 15-8,5; 16-9; 17-9,5; 18-10; 19-10,5; 20-11, 21-11,5; 22-12; 23-12,5; 24-13; e 25-13,5. Destas condições, aquelas que apresentaram velocidade da tocha inferior ao limite máximo de 173 cm/min foram: 19-10,5; 22-12, 23-12,5; 24-13; e 25-13,5 (estas são as condições teoricamente adequadas para a soldagem das juntas sobrepostas com uma velocidade de soldagem de 55 cm/min).

Inicialmente, foi produzida a solda com relação avanço-reversão igual a 19-10,5. A Tabela 6.8 ilustra a imagem do aspecto superficial deste cordão. Nota-se que, mesmo com os valores dos tempos de avanço e reversão e da velocidade da tocha próximos aos limites indicados anteriormente, o cordão apresentou-se de forma irregular, com falhas de deposição ao longo da junta. Os tempos de avanço e de reversão para esta solda foram, respectivamente, 0,67 s e 0,37 (bem superiores aos limites 0,35 s e 0,21s) e a velocidade da tocha foi de 176 cm/min (próxima à velocidade adotada aqui como limite). Mesmo nestas

condições teoricamente adequadas para a realização de um bom cordão, isto não ocorreu. Isto mostra que para grandes comprimentos da reversão (no caso, igual ou maior a 10,5 mm) uma sobreposição de apenas 1 mm não é suficiente para preencher adequadamente a junta. Uma sobreposição maior que 1 mm certamente não iria melhorar o cordão neste caso, já que a velocidade da tocha seria bem maior e menores seriam os tempos de avanço e de reversão. Acredita-se que nestes casos de grandes comprimentos de reversão, tão logo a poça de fusão solidifica, o metal é parcialmente refundido com a reversão. Mas, com o avanço da tocha em alta velocidade, o arco permanece muito pouco tempo e deve ocorrer a formação de uma cavidade, a qual não é preenchida totalmente (pois durante a solidificação o metal contrai devido ter menor volume do que na fase líquida) formando estas descontinuidades ao longo do cordão.

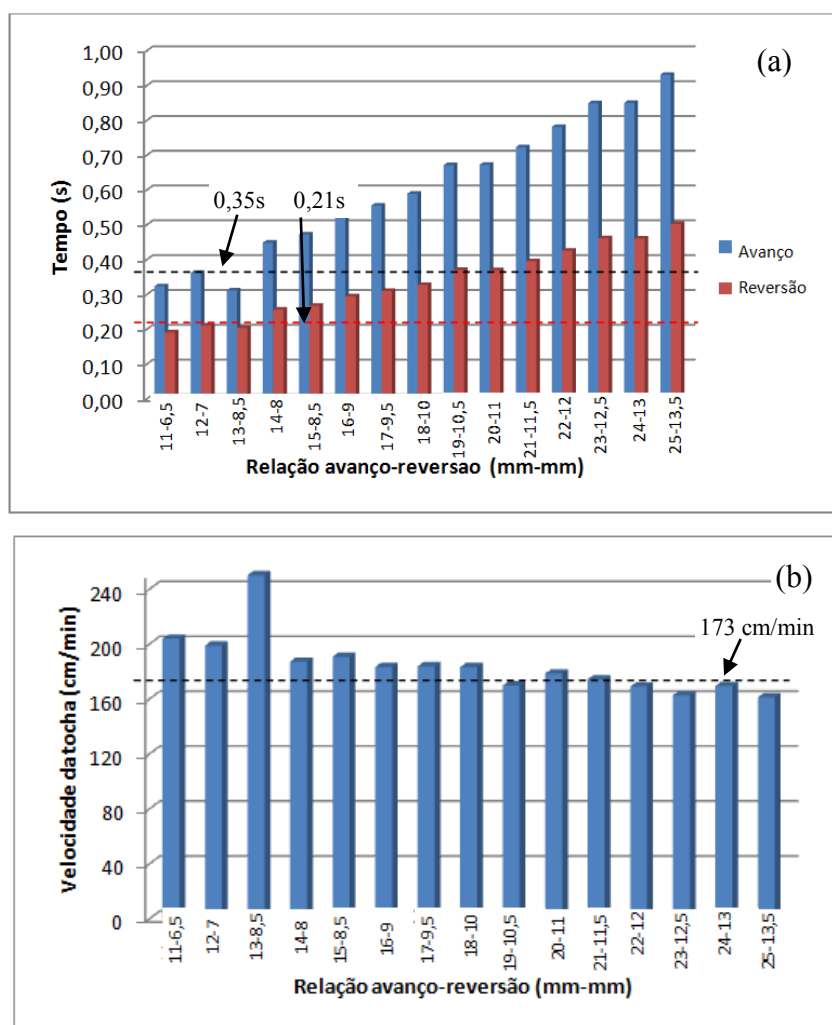
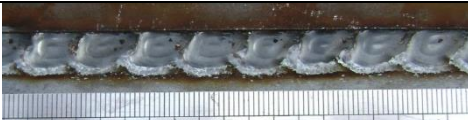




Figura 6.4 – Indicação dos tempos de avanço e reversão (a) e da velocidade da tocha (b) para diversas condições operacionais da técnica switchback, com 1 mm de sobreposição e para uma velocidade de soldagem de 55 cm/min

Tabela 6.8 – Efeito do comprimento da reversão, com uma sobreposição de 1 mm, sobre a qualidade do cordão produzido na soldagem MIG/MAG com switchback, para uma velocidade equivalente de soldagem de 55 cm/min

Relação avanço-reversão (mm-mm)	Veloc. da tocha ajust. (cm/min)	Tempo (s)		Corrente (A)	Aspecto do cordão
		Ava.	Rev.		
19-10,5	176	0,67	0,37	151	
18-10	200	0,54	0,30	150	
14-8	190	0,52	0,29	150	

Este resultado mostrou que não valeria a pena continuar a análise da sobreposição para maiores reversões (por isso, as demais condições da relação avanço-reversão 22-12, 23-12,5; 24-13 e 25-13,5 não foram realizadas). Passou-se, então, verificar a partir de qual reversão inferior a 10,5 mm poderia propiciar em um cordão com geometria regular. Assim, foi testada a condição 18-10, ou seja, uma reversão de 10 mm, 0,5 mm menor do que o caso anterior. O aspecto do cordão é visualizado também na Tabela 6.8. Nota-se que o cordão produzido obteve uma melhor aparência, com maior regularidade geométrica. Este resultado indicou que para menores reversões (abaixo de 10 mm), a junta sobreposta poderia ser soldada de forma satisfatória com a velocidade de 55 cm/min. Para testar essa hipótese, outro cordão foi produzido, agora com uma reversão de 8 mm, ou seja, relação reversão 14-8. Esta condição foi escolhida por apresentar a velocidade da tocha mais próxima do limite adotado, em relação à condição 13-7,5 que também apresenta reversão inferior a 10,5 mm (lembrando que as condições 11-6,5 e 12-7 foram descartadas devido apresentarem tempos de avanço e reversão inferiores aos limites adotados, ver Figura 6.4(a)). A imagem deste cordão está apresentada na Tabela 6.8. Novamente, foi obtido um cordão com geometria regular, similar ao caso anterior, confirmando a hipótese levantada. As seções transversais destes cordões produzidos com uma velocidade de soldagem de 55 cm/min podem ser visualizadas por intermédio da Figura 6.5. Nota-se que não foram observados a presença de defeitos como falta de penetração e/ ou falta de fusão.

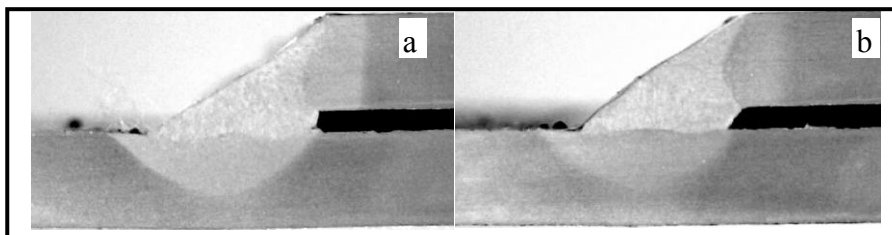


Figura 6.5 – Perfil da seção transversal de cordões produzidos com switchback para uma velocidade de soldagem de 55 cm/min: (a) relação avanço-reversão 14-8; e (b) relação avanço-reversão 18-10

Estes resultados mostram a interdependência entre a sobreposição (e com isso a reversão), a velocidade da tocha e o tempo de permanência da tocha durante as etapas de avanço e reversão. Existe uma pequena faixa de valores estabelecidos para a relação avanço-reversão, com valores adequados para a sobreposição, velocidade e tempo que permite realizar a soldagem de juntas sobrepostas com a técnica switchback em condições de altas velocidades de soldagem (a partir de 45 cm/min). A Figura 6.6 mostra esta faixa mencionada da relação avanço-reversão adequada para a soldagem MIG/MAG Switchback de juntas de topo com 1 mm de abertura, com uma soldagem de 55 cm/min.

A região 1 apresenta combinações da relação com pequenos comprimentos da reversão. Nesta região, a velocidade da tocha é demasiadamente alta (bem superior ao limite de 173 cm/min) e os tempos de avanço e de reversão são muito pequenos (menores que 0,35 s no avanço e 0,21 s na reversão). Por isso, as condições da relação avanço-reversão desta região são inviáveis para a soldagem da referida junta com a técnica switchback. A região 2 apresenta comprimentos intermediários da reversão. Nela, são encontrados valores para a velocidade da tocha e tempos mais próximos daqueles indicados como limites. Assim, as condições da relação avanço-reversão desta região são viáveis para a soldagem das juntas sobrepostas. Finalmente, a região 3 apresenta altos comprimentos da reversão. Nela, têm-se as combinações da relação com as menores velocidades da tocha e com os maiores tempos de avanço e reversão. Achava-se que esta região seria a mais adequada para a soldagem da junta com a velocidade de soldagem requerida. Porém, foi mostrado experimentalmente que os altos valores do comprimento da reversão dificultam a soldagem. De fato, para a soldagem desta junta com alta velocidade de soldagem é necessário a combinação satisfatória entre o comprimento da reversão (levando em consideração a sobreposição de 1 mm), velocidade da tocha (próximo ao limite de 173 cm/min) e tempo (próximo a 0,35s no avanço e 0,21s na reversão).

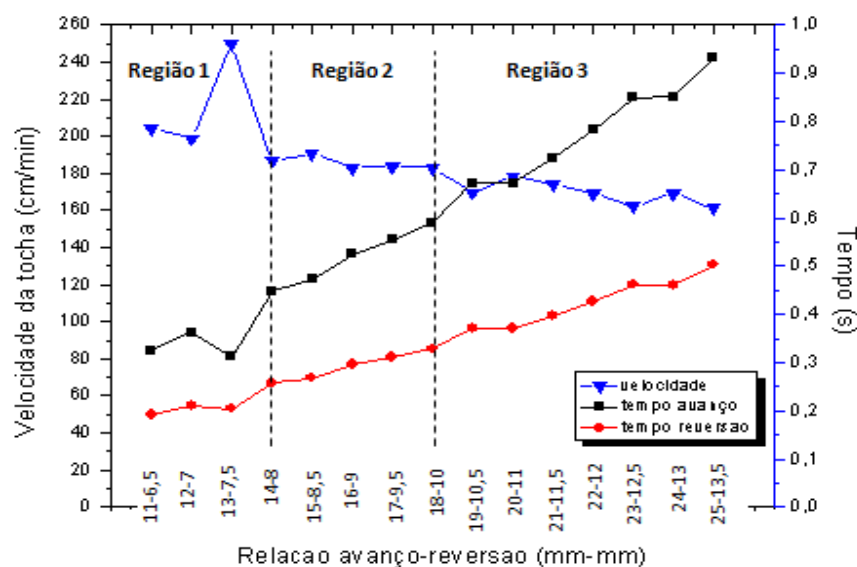


Figura 6.6 – Mapeamento das condições da relação avanço-reversão adequadas para a soldagem MIG/MAG Switchback de juntas de topo com 1 mm de abertura, com uma velocidade de soldagem igual a 55 cm/min: Região 1, com pequenos comprimentos da reversão, região 2 (ótima), com comprimentos intermediários da reversão, e região 3, com altos comprimentos da reversão

Continuou-se a análise da sobreposição para maiores velocidades de soldagem. Novas condições de avanço-reversão foram encontradas para a velocidade de 65 cm/min. A Figura 6.7 mostra estas condições com os respectivos tempos de avanço e reversão (Figura 6.7(a)) e velocidade da tocha (Figura 6.7(b)). Por intermédio desta figura, observa-se que todas as condições apresentaram velocidades acima do limite estabelecido de 173 cm/min. Aquela que mais se aproximou foi a de relação 15-8,5, a que foi, então, testada. Entretanto, a Figura 6.8 indica que este cordão apresentou-se de forma irregular. As demais condições não foram testadas em função das suas maiores velocidades da tocha, condição em que certamente não seria possível a obtenção de um cordão de qualidade. Assim, considerou-se que não foi possível soldar a junta sobreposta com uma velocidade de 65 cm/min. Abaixou-se, desta maneira, a velocidade para 60 cm/min e novos testes foram realizados.

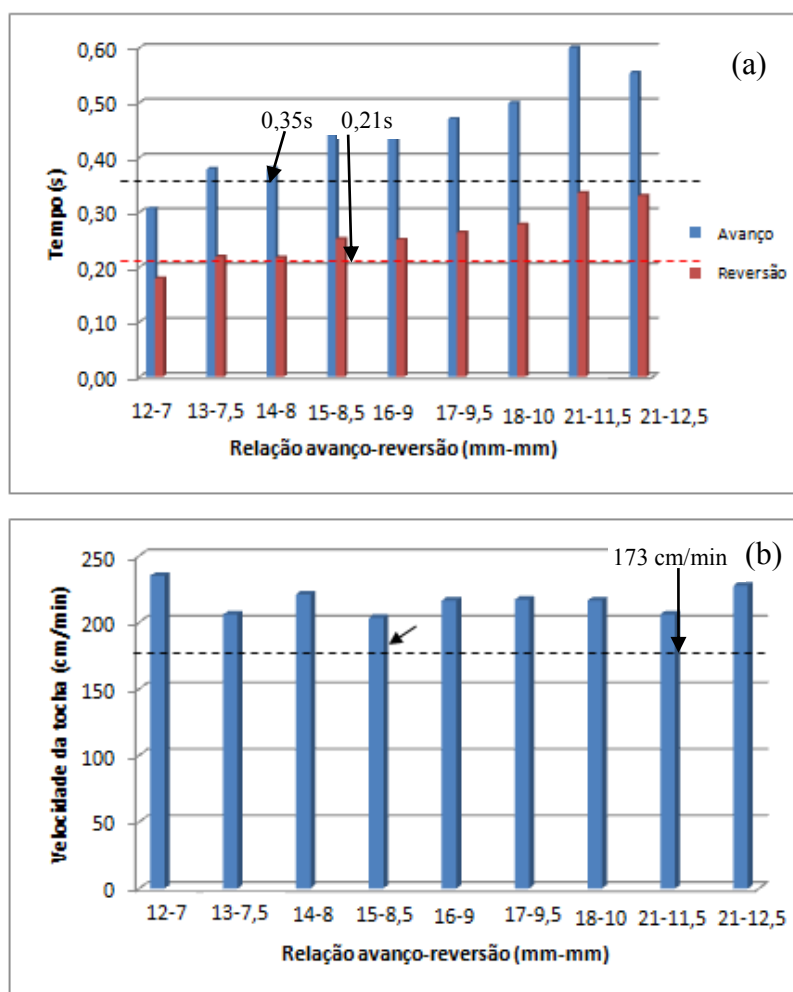


Figura 6.7 – Indicação dos tempos de avanço e reversão (a) e da velocidade da tocha (b) para diversas condições operacionais da técnica switchback, com uma velocidade de soldagem de 65 cm/min



Figura 6.8 – Aspecto do cordão de solda produzido em uma junta sobreposta com 1 mm de folga com switchback (relação avanço-reversão 15-8,5) para uma velocidade de soldagem de 65 cm/min (não foi possível a obtenção de um cordão com qualidade superficial)

A Figura 6.9 apresenta as novas condições da relação avanço-reversão para uma velocidade de 60 cm/min. Novamente, foram escolhidas apenas aquelas condições que apresentaram comprimento de reversão menor do que 10,5 mm, por saber que valores de

comprimento reversão maiores do que este não iriam propiciar a soldagem adequada da junta. Foi escolhida, então, a condição da relação igual a 18-10. A Figura 6.10 mostra que foi possível a produção de um cordão com geometria regular. A seção transversal deste cordão (apresentada na Figura 6.11) não apresentou a ocorrência de descontinuidades. Assim, adotou-se a velocidade de 60 cm/min como limite para a soldagem das juntas sobrepostas de aço carbono com 1 mm de folga. Acima desta velocidade fica difícil estabelecer condições adequadas para a técnica que garantam a soldagem da junta de forma satisfatória. Bruecker (2007) conseguiu uma velocidade máxima de soldagem de 57 cm/min quando foi empregada a técnica switchback nas soldagens de juntas sobrepostas. Os resultados encontrados em seu trabalho estão de acordo com os obtidos neste trabalho.

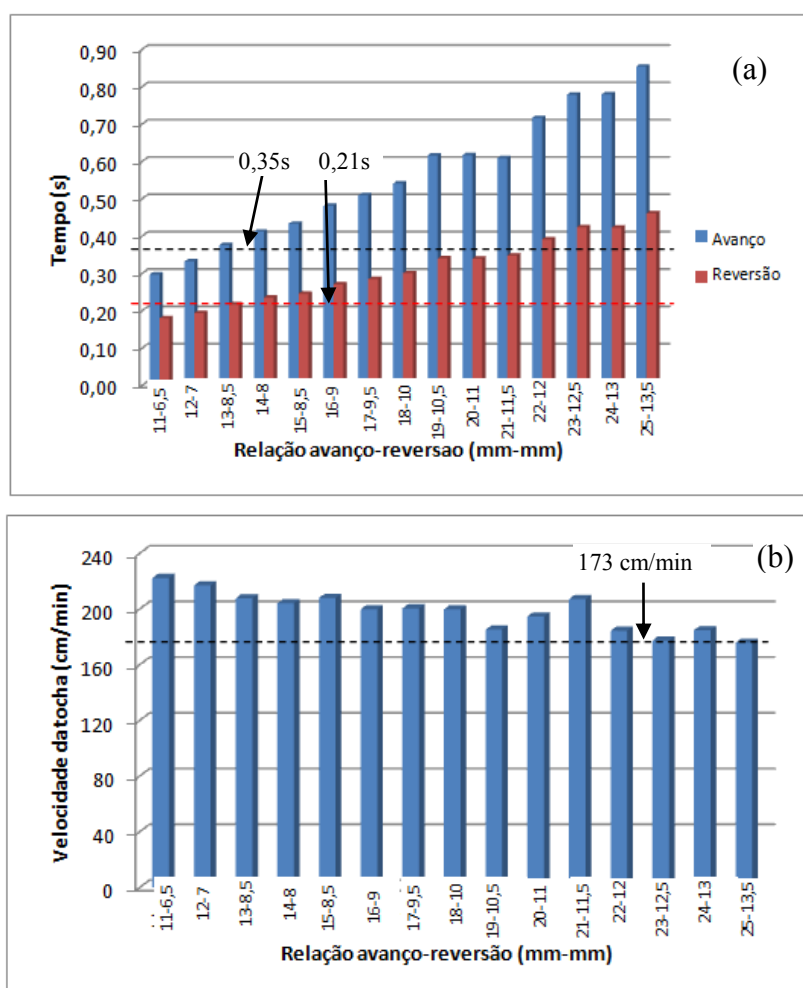


Figura 6.9 – Indicação dos tempos de avanço e reversão (a) e da velocidade da tocha (b) para diversas condições operacionais da técnica switchback, com 1 mm de sobreposição e para uma velocidade de soldagem de 60 cm/min



Figura 6.10 – Aspecto do cordão de solda produzido em uma junta sobreposta com 1 mm de folga com switchback (Relação avanço-reversão 18-10) para uma velocidade de soldagem de 60 cm/min. Foi possível a obtenção de um cordão com qualidade superficial

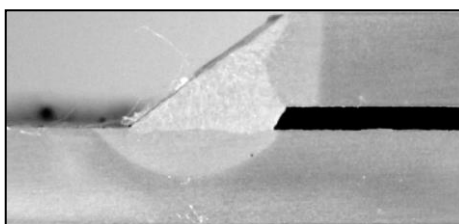


Figura 6.11 – Perfil da seção transversal do cordão produzido com switchback para uma velocidade de soldagem de 60 cm/min: relação avanço-reversão igual a 18-10

6.4 Discussão final

Pôde ser verificado que a técnica switchback tem potencial para aumentar a velocidade limite equivalente de soldagem no processo MIG/MAG. Com o uso desta técnica, a máxima velocidade alcançada na união de juntas sobrepostas de aço carbono com 1 mm de folga foi de 60 cm/min. Sem o uso da técnica, a máxima velocidade encontrada foi de 35 cm/min, ou seja, a implementação da técnica switchback permitiu um ganho de 71% na velocidade de soldagem, aumentando a produtividade do processo MIG/MAG.

Para permitir que a técnica possa ser usada com altas velocidades de soldagem (para os parâmetros de soldagem e juntas em questão), é necessário ajustar o comprimento da reversão para valores que garantam uma velocidade da tocha não muito superior a 173 cm/min e tempo durante as fases de avanço e reversão não inferiores a 0,35 s e 0,21 s, respectivamente. Mas este ajuste do comprimento de reversão deve levar em consideração uma sobreposição de 1 mm. Isto mostra a interdependência entre o comprimento da reversão, a velocidade da tocha e os tempos de avanço e reversão.

Finalmente, pôde ser observado também que para maiores velocidades de soldagem a tendência é utilizar menores comprimentos de reversão (abaixo de 10,5 mm). Acima deste valor, foi verificada a dificuldade na soldagem da junta sobreposta. Então, a técnica switchback pode ser empregada com maiores valores do comprimento da reversão apenas quando são utilizadas menores velocidades de soldagem. A vantagem de se trabalhar com

maiores comprimentos de reversão é que pode ser encontrada uma estrutura de solidificação com grãos equiaxiais mais finos próximos a linha de fusão, como observado no caso das soldas realizadas com um comprimento de reversão igual a 20 mm (relação avanço-reversão igual a 30-20) em experimentos anteriores.

As Figuras 6.12 e 6.13 apresentam, respectivamente a faixa operacional de trabalho para a velocidade equivalente de soldagem com a técnica switchback, para uma relação avanço-reversão constante e igual a 10-5, e equivalência de tempos durante as fases de avanço e reversão. Dentro destas faixas, foram obtidos cordões com bom ou regular aspecto superficial, fator determinante da velocidade limite de soldagem. Como visto, foi possível alcançar uma velocidade limite de até 55 cm/min (figura 6.12). Os cordões produzidos com 45 cm/min e 55 cm/min apresentaram aspecto superficial regular, com algumas pequenas variações na geometria do cordão, que podem estar associadas aos baixos tempos de permanência do arco elétrico nas fases de avanço e reversão, devido às elevadas velocidades da tocha empregadas. Assim, buscou-se aumentar os tempos de avanço e de reversão da tocha para, respectivamente, 0,81s e 0,41s. Estes tempos permaneceram constantes durante o aumento da velocidade equivalente, o que culminou na mudança da relação avanço-reversão, como indicado na Figura 6.13.

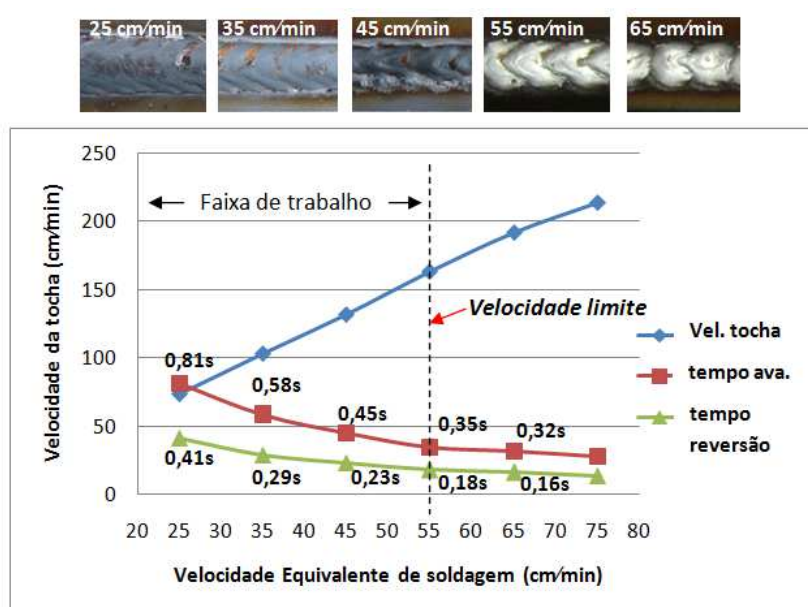


Figura 6.12 – Faixa operacional de trabalho da velocidade equivalente de soldagem para uma relação avanço-reversão igual a 10-5

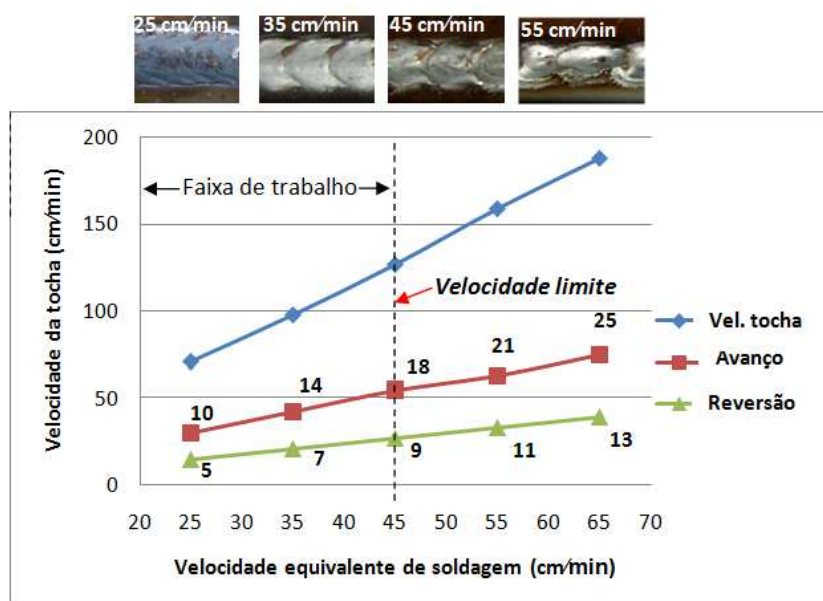


Figura 6.13 – Faixa operacional de trabalho da velocidade equivalente de soldagem para uma equivalência de tempos

Foi observada uma menor faixa operacional da velocidade equivalente de soldagem, sendo alcançado um limite igual a 45 cm/min. Com 55cm/min, o cordão apresentou-se irregular, diferentemente daquele produzido com a mesma velocidade e apresentado na Figura 6.12. Isso mostra que mesmo com os elevados tempos de permanência do arco entre as reversões, a utilização de grandes comprimentos de avanço e reversão (no caso acima de 18 mm e 9 mm respectivamente) dificulta a formação do cordão.

A Figura 6.14 apresenta o efeito isolado da sobreposição de 1 mm na reversão sobre a velocidade limite de soldagem. Nota-se que na soldagem equivalente de 45 cm/min, o aspecto superficial do cordão foi melhor quando o comprimento da reversão foi de 5 mm para 6 mm (nova relação de 10-6), mesmo com um aumento da velocidade da tocha para 200 cm/min (na relação 10-5, a velocidade alcançada da tocha foi de 132 cm/min) e uma redução dos tempos para 0,35s no avanço e 0,21s na reversão (na relação 10-5, os tempos foram 0,45s e 0,23s, respectivamente). Isto mostra que a sobreposição deve ser considerada quando altas velocidades equivalentes forem requeridas. Entretanto, esta mesma figura mostra que para a velocidade de 55 cm/min não foi possível produzir um cordão com aspecto regular, o que certamente está ligado aos baixos tempos e velocidade da tocha demasiadamente alta. Assim, deve-se buscar utilizar a sobreposição de 1 mm quando se deseja aumentar a velocidade limite, mas tentando encontrar uma relação avanço-reversão com os maiores tempos possíveis de avanço e reversão.

A Figura 6.15, por sua vez, mostra que para uma sobreposição de 1 mm na reversão foi possível aumentar os tempos de permanência quando foram modificados os comprimentos

de avanço e reversão. Para uma velocidade de 55 cm/min foi observado um cordão com bom aspecto superficial, com tempos de avanço e reversão de, respectivamente, 0,52s e 0,29s. Com a adoção da sobreposição e com o ligeiro aumento dos tempos foi possível aumentar a velocidade limite para 60 cm/min.

Os resultados mostram no geral que a velocidade limite tem um maior alcance quando são utilizados baixos comprimentos de reversão da tocha (menor que 10 mm), com a adoção de sobreposição de 1mm na reversão, buscando aumentar ligeiramente os tempos de permanência do arco elétrico nas fases de avanço e reversão.

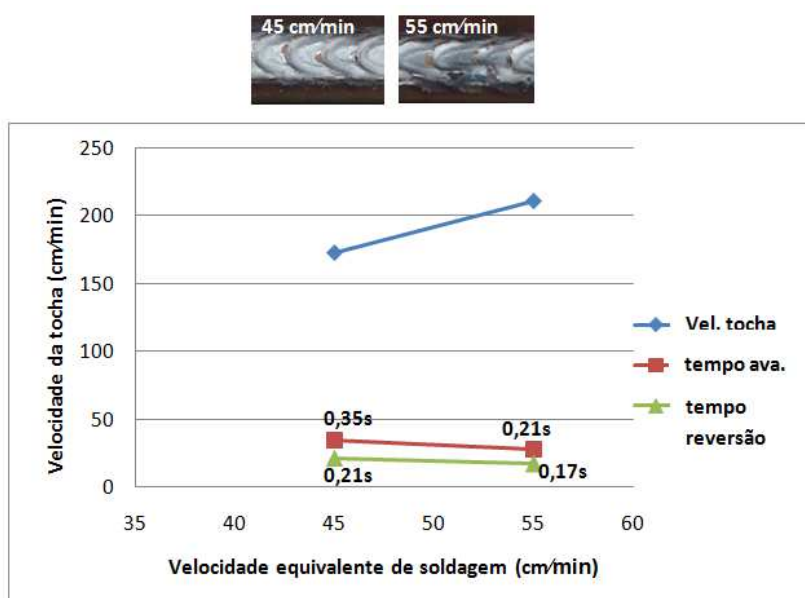


Figura 6.14 – Efeito da sobreposição de 1mm na reversão sobre a velocidade limite para uma relação avanço-reversão igual a 10-5

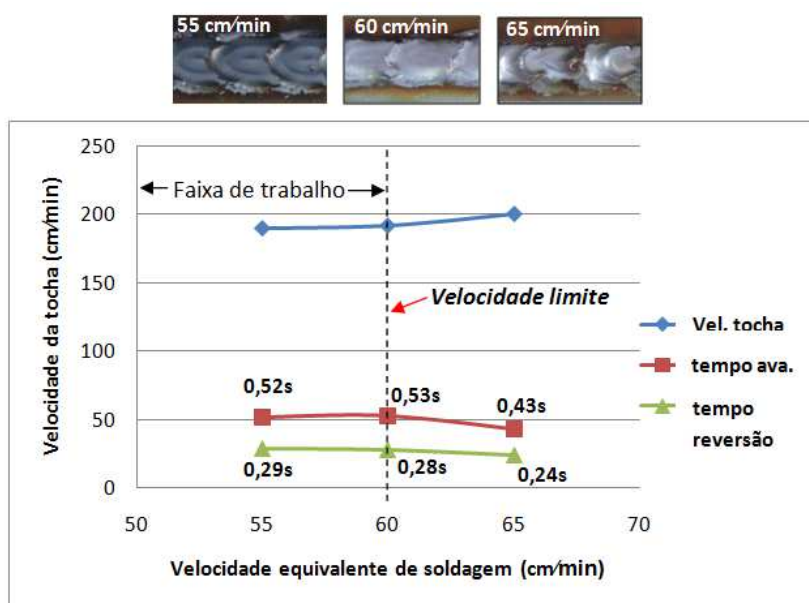


Figura 6.15 – Efeito da sobreposição de 1mm na reversão sobre a velocidade limite para uma relação avanço-reversão igual a 10-5

CAPÍTULO VII

Avaliação da Potencialidade da Técnica Switchback na Posição Filete Sobrecabeça

7.1 Procedimento Experimental

Soldagens robotizadas com a técnica switchback foram realizadas na posição horizontal em placas de testes fabricadas a partir de barras chatas de aço ao carbono ABNT 1020 de 3,3 mm de espessura, 35 mm de largura e 180 mm de comprimento. A Figura 7.1 ilustra a disposição dessas barras para formar uma junta do tipo sobreposta. Foi mantida uma folga de 1 mm para simular uma condição ainda mais crítica do ponto de vista de formação do cordão. A Figura 7.2 ilustra a posição do cordão e respectivos ângulos de ataque e trabalho da tocha, caracterizando tratar-se de soldagens na posição filete sobrecabeça. Foi usado um ângulo de inclinação da tocha (ângulo de ataque) de aproximadamente 15° (condição empurrando-puxando) e um ângulo de trabalho de 30° . A corrente média de soldagem manteve-se constante em 150 A, para uma velocidade de alimentação do arame de 4 m/min. O arame eletrodo usado foi da classe AWSER70S-6, com 1,2 mm de diâmetro, e a distância bico de contato peça de 18 mm. O gás utilizado foi a mistura Argônio + 2% Oxigênio, a uma vazão de 15 l/min. A Tabela 3.2 do capítulo 3 mostra os parâmetros utilizados para regulação do processo de soldagem em corrente pulsada.

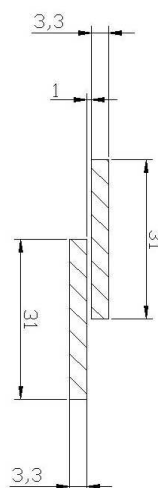


Figura 7.1 – Representação da junta sobreposta usada nas placas de teste para avaliar a técnica switchback na posição filete sobrecabeça, unidades em mm

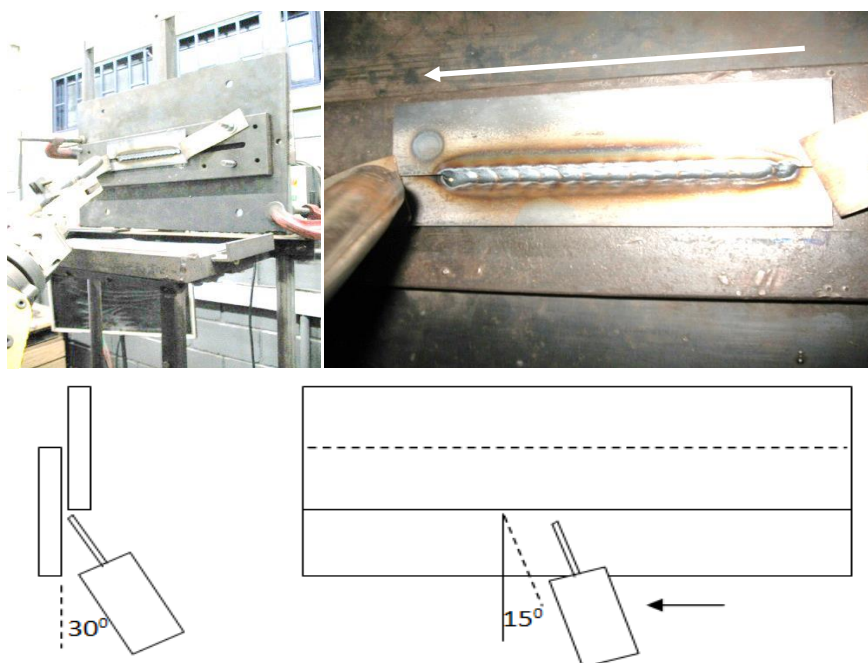


Figura 7.2 – Esquematisação do posicionamento da tocha em relação à placa de teste para a soldagem automatizada com a técnica switchback na posição filete sobrecabeça em uma junta sobreposta

A velocidade de soldagem foi aumentada progressivamente de 35 cm/min até 60 cm/min, de acordo com a Tabela 7.1. Para cada uma destas velocidades, foi utilizada uma condição da relação avanço-reversão da técnica switchback que melhor se adequasse para produzir cordões com bom aspecto superficial e geométrico (essas condições foram encontradas durante o estudo da velocidade limite de soldagem na posição plana, apresentadas no Capítulo VI). Para efeito de comparação, também foram realizadas soldagens sem o emprego da técnica, ou seja, com os mesmos parâmetros (Tabela 3.2),

mas só em uma direção (linear). Cada condição de soldagem foi replicada uma vez, dando um total de 16 experimentos. Após as soldagens, foram retiradas amostras da seção transversal de cada placa de teste (na região central) para serem submetidas ao ensaio macrográfico.

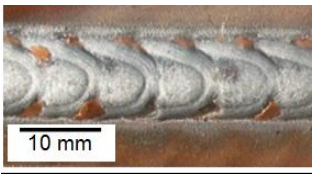

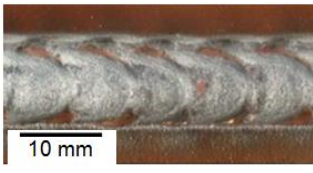



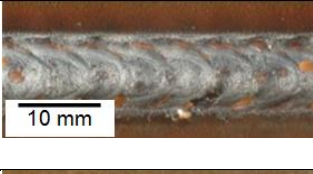

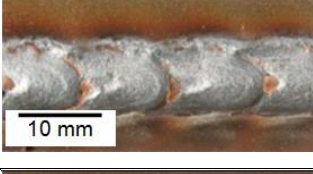







Tabela 7.1 – Condições da técnica avaliadas com o aumento da velocidade de soldagem, durante a soldagem das placas de teste na posição filete sobrecabeça

Técnica	Velocidade equivalente de soldagem (cm/min)	Relação Avanço-reversão (mm – mm)	Velocidade da tocha (cm/min)	Placas de Teste
Switchback	35	14 - 7	98	A1
				A2
	45	10 - 6	173	A3
				A4
	55	18 - 10	190	A5
				A6
	60	18 - 10	200	A7
				A8
Linear	35	----	----	B1
				B2
	45	----	----	B3
				B4
	55	----	----	B5
				B6
	60	----	----	B7
				B8

7.2 Resultados

Pela Tabela 7.2, pode-se observar o aspecto escamoso da superfície dos cordões, característico da técnica switchback. A análise da seção transversal não evidenciou o surgimento de imperfeições, como falta de penetração, mostrando o bom comportamento da poça de fusão com o emprego da técnica, mesmo com a utilização de velocidades de soldagem tão altas como 60 cm/min.

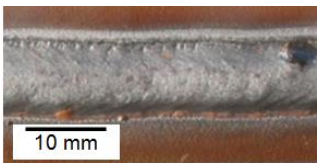



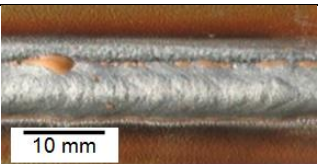
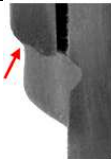
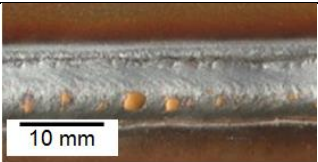
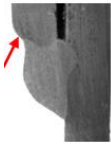
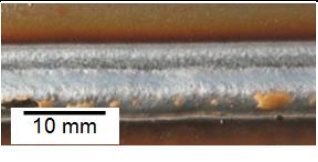
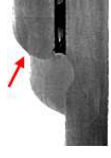
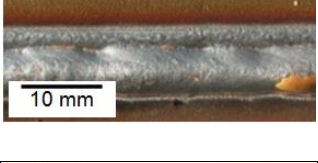
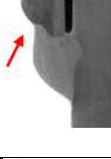
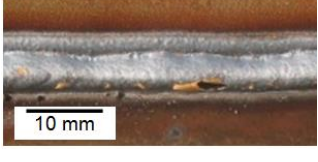
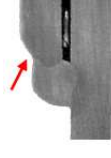
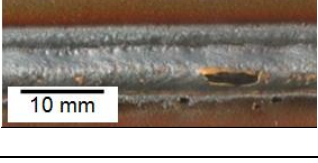

Tabela 7.2 – Aspecto superficial e do perfil transversal das soldas obtidas com a técnica Switchback

Velocidade equivalente de soldagem	Placa de Teste	Aspecto superficial do cordão	Perfil transversal do cordão
35	A1		
	A2		
45	A3		
	A4		
55	A5		
	A6		
60	A7		
	A8		

O mesmo comportamento não se repetiu nas soldas produzidas sem o emprego da técnica switchback. Como pode ser observado na Tabela 7.3, foi verificada a falta de deposição na margem superior dos cordões produzidos a partir de uma velocidade de 45 cm/min, sendo mais evidente na velocidade de 60 cm/min. Além disso, houve uma tendência da penetração ser assimétrica, ou seja, maior na parede inferior da junta e menor na parede superior. Essas tendências não foram observadas no caso do uso da técnica switchback. Isto pode ter ocorrido em função da poça de fusão esfriar mais rapidamente durante as etapas de avanço da tocha em alta velocidade. Isto favorece a um aumento da viscosidade do metal líquido, retendo o volume da poça de fusão na junta de forma homogênea e favorecendo a uma solidificação do metal líquido de forma regular, ou seja, mais simétrica.

Na literatura corrente, encontram-se trabalhos que apontam dificuldades para realização de soldagem na posição horizontal (posição menos crítica do que a usada), devido à atuação da força gravitacional. Yang et al (2009) propuseram a rotação do arco elétrico de forma mecanizada no processo MIG/MAG, para melhorar a soldagem na horizontal de juntas de aço com chanfro estreito. A frequência de rotação da ponta do arame foi variada de 0 Hz a 19 Hz e o raio de rotação da ponta do arame de 2mm a 4 mm. Os resultados indicaram que a seção transversal do cordão apresentou-se assimétrica quando não foi utilizada uma velocidade de rotação do arco (0 Hz), ou seja, mais material depositado na parte inferior da junta do que na parte superior. Porém, para uma faixa de velocidade de 2,5 Hz a 8,5 Hz e com um raio de rotação de 2,0 a 3,2 mm houve a formação de cordões com boa regularidade geométrica, depositando material metálico de forma simétrica entre as partes superior e inferior da junta, garantindo uma penetração regular. Eles explicam que com a rotação do arco com uma faixa de velocidade e raio de rotação adequados possibilitam distribuir melhor na junta a força do arco, agindo de forma a não favorecer a força de gravidade, o que de acordo com os autores seria a principal força responsável para promover a assimetria das soldas produzidas na soldagem horizontal. Além disso, a velocidade de rotação contribui para distribuir melhor o calor do centro da poça de fusão para as bordas superior e inferior, reduzindo o aporte de calor, minimizando a possibilidade do metal líquido cair, facilitando a solidificação do cordão.

Tabela 7.3– Aspecto superficial e do perfil transversal das soldas obtidas sem o emprego da técnica switchback (movimento linear)

Velocidade equivalente de soldagem	Placa de Teste	Aspecto superficial do cordão	Perfil transversal do cordão
35	B1		
	B2		
45	B3		
	B4		
55	B5		
	B6		
60	B7		
	B8		

Guo et al. (2009) também analisaram o efeito da rotação do arco sobre a transferência metálica durante a soldagem MIG/MAG de placas de aço com chanfro estreito na posição horizontal. A partir da filmagem em alta velocidade da poça de fusão e da transferência de metal, eles observaram que a frequência de rotação do arco tem efeito sobre a transferência metálica e, com isso, no modo como o metal é depositado no fundo do chanfro. Para baixas frequências de rotação, menor do que 20 Hz, existiu uma mudança da transferência metálica do modo spray para os modos globular e/ou curto-circuito, no lado inferior da parede do chanfro. Isto porque nesta região, devido à ação da gravidade, forma-se um acúmulo de material metálico, provocando a redução do comprimento do arco. A força gravitacional e a de tensão superficial (devido à ocorrência de alguns curtos-circuitos) tem, assim, maior efeito do que as forças centrífugas (devido à rotação do arco), pressão do plasma e eletromagnética. Porém, com o aumento da frequência acima de 20 Hz, eles observaram uma menor ação da força gravitacional, inibindo a mudança da transferência spray para globular e/ou curto circuito. A força centrífuga teve um maior efeito que a gravitacional, favorecendo a regularidade da penetração da poça de fusão no fundo do chanfro.

Acredita-se que a melhoria observada nas soldagens produzidas com a técnica switchback pode estar ligada com a redução da fluidez (aumento da viscosidade) da poça de fusão, devido aos movimentos de avanço e reversão do arco em alta velocidade. O efeito da gravidade não teria, assim, tempo para atuar. Esta hipótese se sustenta pelos próprios resultados de Yang et al. (2009) (mas não pelos de Guo et al., 2009), pois a rotação do arco em baixas frequências (de 2,5 Hz a 8,5 Hz) também pode ter contribuído para reduzir a fluidez da poça durante a sua solidificação, melhorando a simetria da solda. Entretanto, não é tão óbvio que uma menor frequência de oscilação (rotação do arco) possa mudar a temperatura da poça de tal modo a reduzir a viscosidade. O fato dos melhores resultados de Guo et al. (2009) terem sido alcançados para maiores frequências pode ter sido devido ao gás de proteção usado ser diferente (Yang et al. usaram Ar+20%CO₂ e Guo et al. usaram Ar+5%CO₂).

7.4 Comentários Finais

A técnica Switchback mostrou potencial para a soldagem fora da posição plana (no caso, posição filet sobrecabeça), sem a ocorrência de defeitos na seção transversal dos cordões. Foi possível a soldagem, para os dados parâmetros, em velocidade equivalente de até 60 cm/min, diferentemente de quando não se utilizou a técnica (acima de velocidade de 35 cm/min houve falta de deposição de material e assimetria na penetração do cordão). A

hipótese mais provável é o efeito da maior distribuição do calor com a técnica switchback, fazendo com que a poça torne-se mais fria, consequentemente com menor viscosidade, limitando o efeito de escorrimento do cordão causado pela gravidade.

CAPÍTULO VIII

Avaliação do Efeito da Técnica Switchback sobre o Comportamento Mecânico de Juntas Soldadas

8.1 Introdução

É razoável se esperar que a formação de uma região recristalizada no fundo do cordão promova melhorias da tenacidade do cordão, principalmente em temperaturas abaixo de zero grau. Por isto, os metais de solda produzidos por ambos modos foram avaliados pelo ensaio de impacto Charpy, segundo a norma ASTM E 23. Como os cordões de solda são muito pequenos, para que fosse possível retirar as amostras de um único cordão, elas foram produzidas com tamanho reduzido (segundo norma ASTM E 23). Assim, foi necessário utilizar um equipamento Charpy de baixa energia (50 J).

8.2 Metodologia adotada para a avaliar o comportamento mecânico das soldas produzidas

8.2.1 Preparação das Placas de teste e das amostras para ensaio Charpy

As placas de teste foram preparadas para receber o depósito de um único cordão. Elas foram produzidas a partir do corte de uma barra chata de aço carbono ABNT 1020, com 6,35 mm de espessura e 63,5 mm de largura. O comprimento de cada placa de teste foi de 180 mm. As dimensões de largura e espessura foram necessárias para que se pudesse retirar amostras para o ensaio Charpy após a soldagem, com seção reduzida 10 mm x 3 mm e comprimento de 55 mm, como indicado na Figura 8.1. Isto porque as amostras deveriam ser retiradas de um único cordão e não de uma junta soldada com vários passes (como

geralmente é realizado), pois isto certamente iria mascarar o efeito da técnica sobre a tenacidade do cordão.

Na linha central de cada placa de teste, foi usinado um chanfro para receber o depósito de solda. Foram testadas várias configurações do chanfro, pois nos testes preliminares todas as placas de testes soldadas apresentaram falta de fusão, como indicado na Tabela 8.1. Assim, buscou-se adequar o perfil do chanfro para eliminar este problema. Foram feitas diversas modificações na geometria do chanfro, sendo que a melhor configuração foi aquela quando foi fabricado um chanfro com perfil tipo “prato”, em que as paredes do chanfro tiveram um perfil arredondado, com um ângulo do chanfro superior a 75° , uma folga de 5 mm e com o arredondamento dos cantos “vivos” da folga.

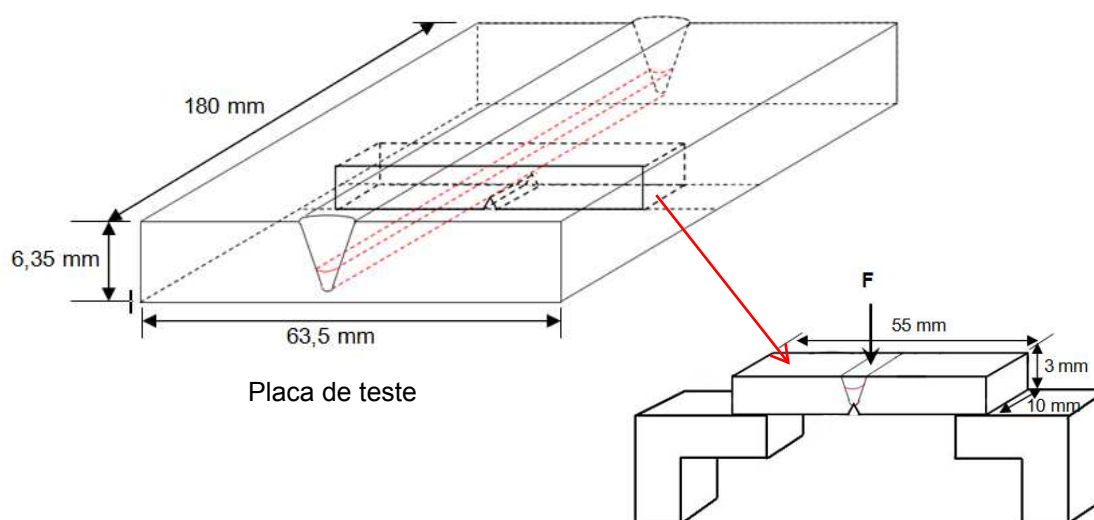


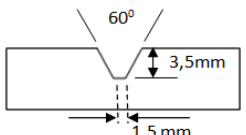
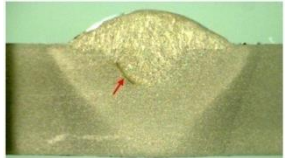
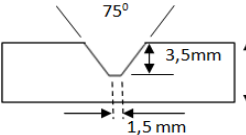
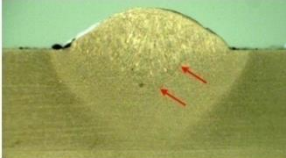
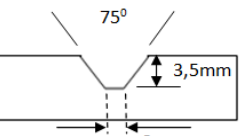

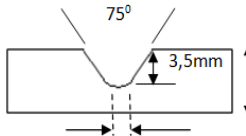
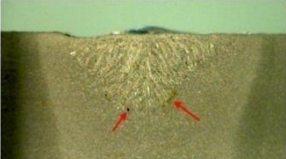
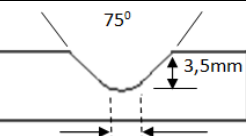

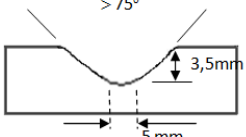

Figura 8.1 – Esquema ilustrativo das dimensões da placa de teste e da amostra com seção reduzida retirada para ensaio Charpy

A Figura 8.2 mostra a imagem retirada de uma placa de teste utilizada durante os experimentos. O chanfro com perfil tipo “prato” foi fabricado em uma plaina mecânica e em duas etapas. Utilizou-se uma ferramenta de corte de aço rápido (bit) com angulação de 75° para abrir o chanfro com uma folga de aproximadamente 5 mm. Na segunda, utilizou-se outro bit com a aresta de corte arredondada para retirar os cantos “vivos” da folga e garantir um perfil curvo das paredes do chanfro.

Como foram feitas modificações no perfil do chanfro e, além disso, como a espessura das placas de teste utilizada nesta etapa do trabalho foi maior (6,35 mm) do que nos experimentos anteriores, houve uma preocupação em analisar a estrutura de solidificação do metal de solda produzida para confirmar a presença da recristalização de grãos no fundo do cordão. Assim, foi retirada uma amostra da seção longitudinal da placa de teste soldada para parametrização e submetida à análise metalográfica por microscopia óptica. O resultado é observado na Figura 8.3. Como pode ser verificado nessa figura, novamente foi

observada a região com recristalização de grãos no fundo do cordão. Este resultado permitiu que fossem confeccionadas as placas de teste com o perfil do chanfro tipo “prato”, para que fossem retiradas as amostras para o ensaio Charpy.

Tabela 8.1 – Configurações do chanfro testadas para a fabricação das Placas de teste

Modificação das dimensões do chanfro	Configuração do chanfro da junta testada	Seção transversal da Junta soldada
---	 (Condição inicial para teste)	
Aumento do ângulo		
Aumento da folga		
Arredondamento dos cantos “vivos” da folga		
Aumento da folga		
Arredondamento das paredes do chanfro Perfil tipo “prato”		

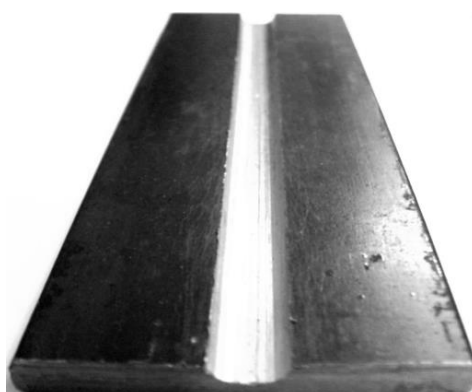


Figura 8.2–Placa de teste com chanfro tipo “prato”

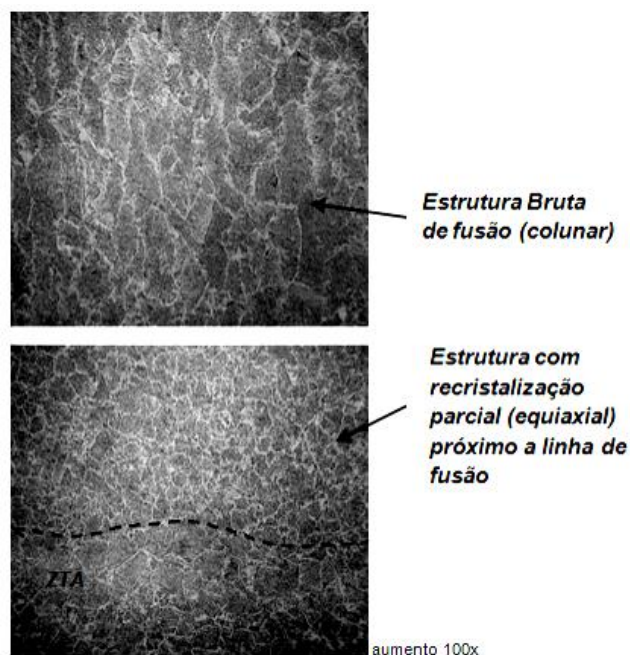


Figura 8.3—Verificação da ocorrência da recristalização de grãos próximo à linha de fusão com a mudança da espessura das placas de teste e da configuração do chanfro

Foram preparadas um total de 8 placas de teste. Destas, 4 foram soldadas com a técnica switchback, na mesma condição de avanço de 30 mm e de reversão de 20 mm. Esta relação avanço-reversão foi adotada em função de já ter sido mostrado, em um capítulo anterior (ver capítulo 4), uma estrutura de recristalização mais refinada no fundo do cordão. A corrente média de soldagem manteve-se em 150 A. Os parâmetros de corrente pulsada, bem como as demais variáveis de soldagem utilizadas (velocidade de alimentação do arame, vazão do gás, distância bico de contato peça, etc..) foram os mesmos apresentados no Capítulo 2. Outras 4 placas de teste foram soldadas sem a técnica e na mesma parametrização apresentada no Capítulo 2. Finalmente, após as soldagens destas placas, elas foram seccionadas para a retirada de 10 amostras para o ensaio Charpy, em cada uma, dando um total de 80 amostras. Estas amostras foram processadas em plaina mecânica, para as dimensões indicadas na Figura 8.1.

Com relação ao entalhe, foi fabricado (também na plaina mecânica) com um ângulo de 45° , uma profundidade de 0,6 mm e um raio de curvatura de 0,25 mm, de acordo com a norma ASTM E 23. Para posicioná-lo corretamente no fundo do cordão, previamente a seção transversal de cada amostra foi lixada, polida e atacada com Nital 2% (com a finalidade de observar o perfil do cordão, como indicado na Figura 8.4(a)). Em seguida, iniciou-se a usinagem das amostras pelo lado oposto da soldagem (Figura 8.4(b)), rebaixando toda a face inferior até atingir uma distância de 0,6 mm do fundo do cordão (este

valor equivale a profundidade do entalhe). Depois, posicionou-se a ferramenta de corte com ângulo de 45° na direção do fundo do cordão e o entalhe foi fabricado (Figura 8.4(c)). Finalmente, foi realizada a usinagem do lado da soldagem (Figura 8.4(d)), rebaixando a face superior da amostra até atingir uma altura de 3 mm (Figura 8.4(e)). Este mesmo procedimento foi realizado para as amostras sem a técnica. A Figura 8.5 apresenta o posicionamento do entalhe no fundo de um cordão produzido com a técnica switchback. Nota-se nesta imagem que não é perceptível a região recristalizada, indicando que esta região pode não estar surgindo de forma constante no fundo do cordão. Para tirar dúvidas quanto a sua presença, foi analisada a microestrutura da seção longitudinal desta mesma amostra, após a sua fratura. A Figura 8.6 confirma a existência de recristalização de grãos no fundo do cordão. O entalhe foi produzido para iniciar a trinca no fundo do cordão, na região recristalizada (para o caso das amostras das placas de testes realizadas com a técnica, enquanto a mesma profundidade foi aplicada nas amostras em que a placa de teste foi soldada sem a técnica), para que fosse avaliada a resistência quando ao início da propagação da trinca durante o ensaio.

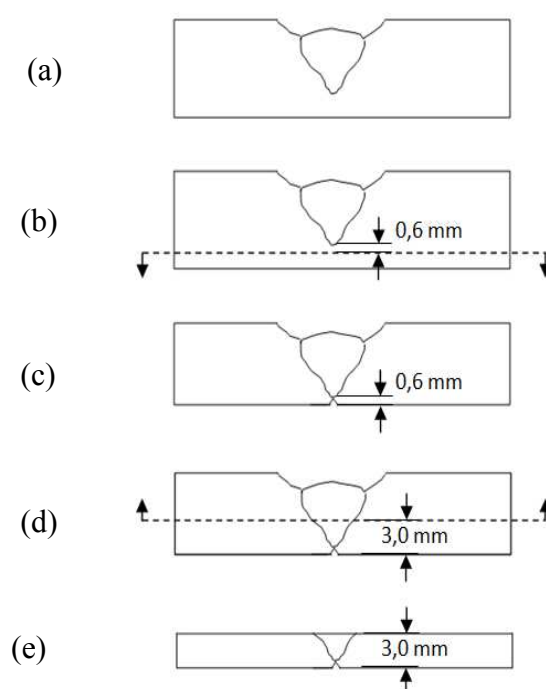


Figura 8.4– Ilustração das etapas de confecção das amostras

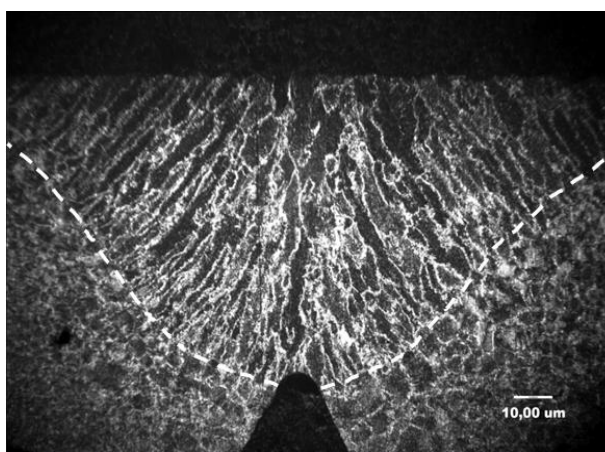


Figura 8.5 – Posicionamento do entalhe no fundo de um cordão produzido com a técnica switchback

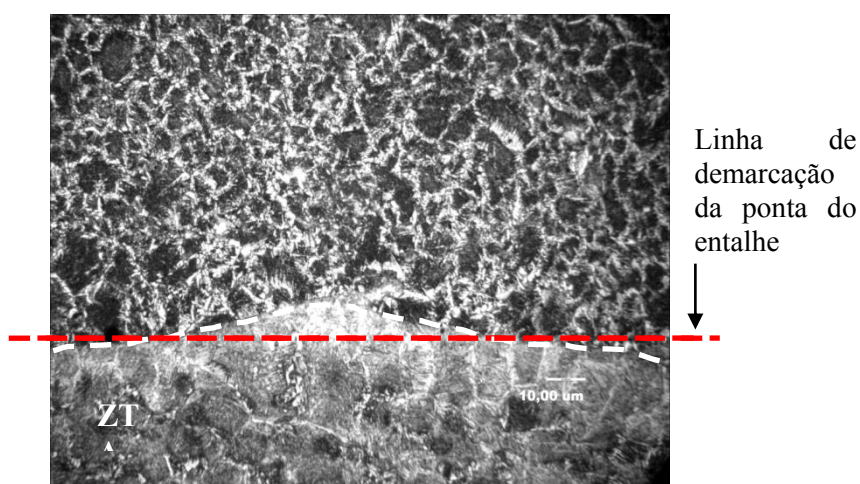


Figura 8.6 – Formação da região de recristalização no fundo do cordão e observada na seção longitudinal do metal de solda da amostra apresentada na figura 8.5

8.2.2 – Verificação da adequação do equipamento para ensaio Charpy e condições do teste

Para a realização do ensaio Charpy, foi utilizada uma máquina de impacto de pequeno porte, com capacidade máxima de 50 J, instalada no Laboratório de Tribologia e Materiais da UFU (LTM). Este equipamento foi usado por entender que teria uma melhor sensibilidade para avaliar a pequena área recristalizada, localizada na reduzida seção ($10 \times 3 = 30 \text{ mm}^2$) da amostra. Para avaliar o desempenho do equipamento, testes preliminares foram realizados, na temperatura ambiente, com amostras preparadas do metal de base utilizado (aço ABNT carbono 1020) sem soldagem. Foram testadas um total de 9 amostras na temperatura ambiente. A energia inicial adotada para os testes preliminares foi de 15 J, ajustada no equipamento Charpy. Todas as amostras testadas apresentaram uma fratura

parcial e dúctil, como indicado na Figura 8.7. As energias absorvidas são visualizadas na Figura 8.8. A média foi de 4,7 J, com um desvio padrão de $\pm 0,3$ J. O coeficiente de variação, ou seja, a relação entre o desvio e a média, foi igual a 5,6%. Este pequeno percentual indica a baixa dispersão dos valores encontrados, indicando a repetitividade dos resultados e a confiabilidade do ensaio.

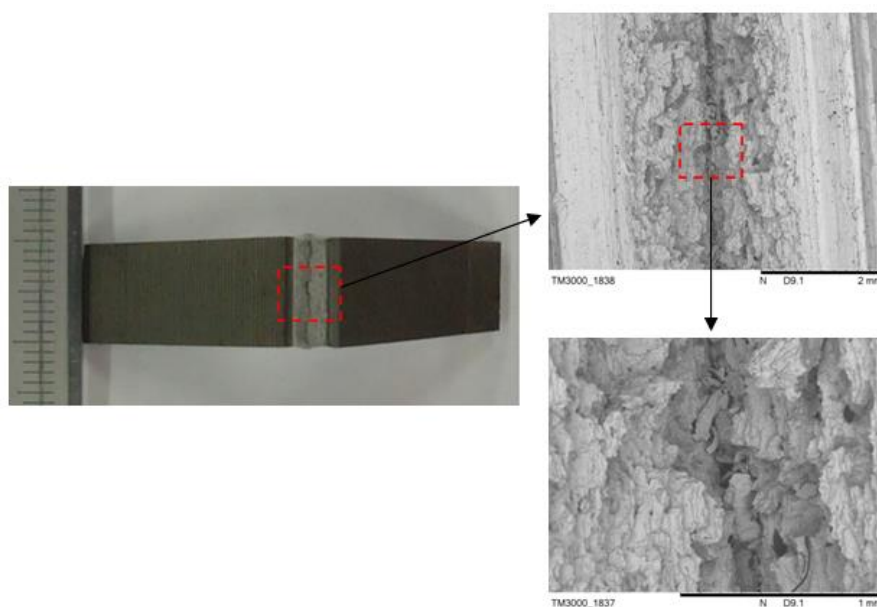


Figura 8.7 – Fratura parcial e dúctil das amostras retiradas do metal de base

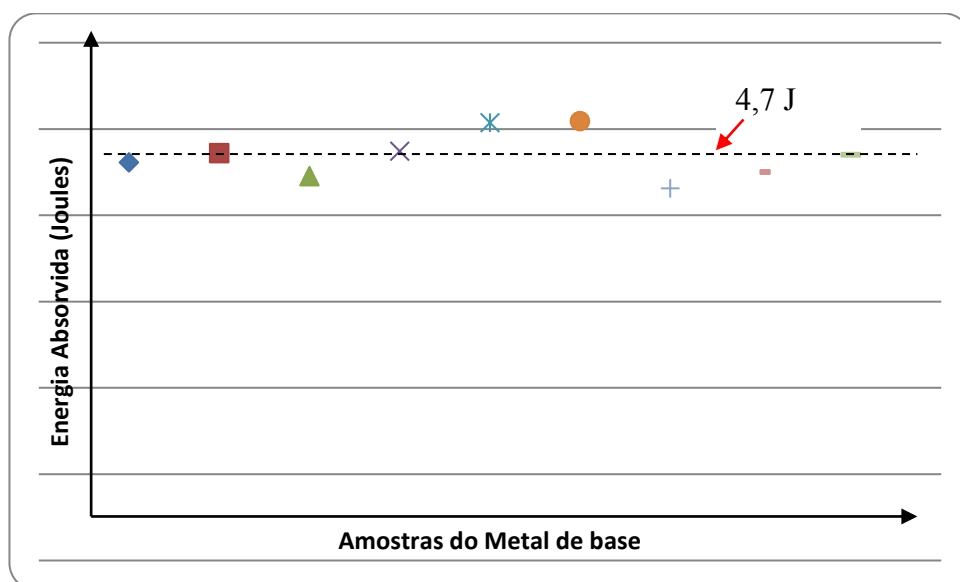


Figura 8.8 – Energia absorvida em cada amostra do metal de base na temperatura ambiente

As amostras fabricadas a partir do metal de solda foram programadas para serem avaliadas em duas temperaturas, 0°C e -50°C (cinco amostras em cada temperatura). Para conseguir que elas tivessem a temperatura de 0° , as mesmas foram mergulhadas em um recipiente contendo água com gelo, durante um tempo aproximado de 15 min. A temperatura

foi verificada com um termômetro de bulbo. Já a temperatura de -50°C foi conseguida mergulhando as amostras em um recipiente contendo nitrogênio líquido, também por um tempo aproximado de 15 min, mas não foi possível se certificar da temperatura que a amostra alcançou. Por isto, doravante esta temperatura será indicada como sub-zero. A Tabela 8.2 apresenta a identificação das amostras de acordo com a utilização da técnica e da temperatura de ensaio.

Tabela 8.2 – Codificação das placas de teste soldadas e das amostras avaliadas

	Com emprego da técnica				Sem o emprego da técnica			
Placas de Teste produzidas	1	2	3	4	5	6	7	8
Amostras testadas a sub-zero	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Amostras testadas a 0°C	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8

8.3 Avaliação do comportamento mecânico das soldas produzidas

A Figura 8.9 apresenta o aspecto superficial de alguns cordões produzidos, um com a técnica switchback e outro sem a técnica, sobre um chanfro com perfil tipo prato. A corrente de soldagem manteve-se constante no valor médio de 150 A. Percebe-se que não foi necessário preencher totalmente o chanfro para a retirada das amostras com seção reduzida. É notável e característico o aspecto “escamoso” do metal de solda produzido com a técnica, contrastando com o aspecto liso do cordão obtido sem a técnica.

A Tabela 8.3 apresenta os resultados encontrados para a energia absorvida na temperatura de 0°C . Os valores médios obtidos com o emprego da técnica ficaram próximos daqueles obtidos sem o seu emprego, sendo a média global obtida com a técnica foi de $10,55 \pm 0,28$ J, enquanto que a média global obtida sem a sua utilização foi de $11,11 \pm 1,04$ J. Do ponto de vista estatístico, pode-se dizer que os resultados são iguais, o que era esperado para esta temperatura. A Figura 8.10 mostra o comportamento verificado para a energia absorvida. Observa-se que os valores médios obtidos quando a técnica foi utilizada

estão dentro da dispersão (desvio) das médias obtidas sem o emprego da técnica, confirmado que não houve a diferença já mencionada.

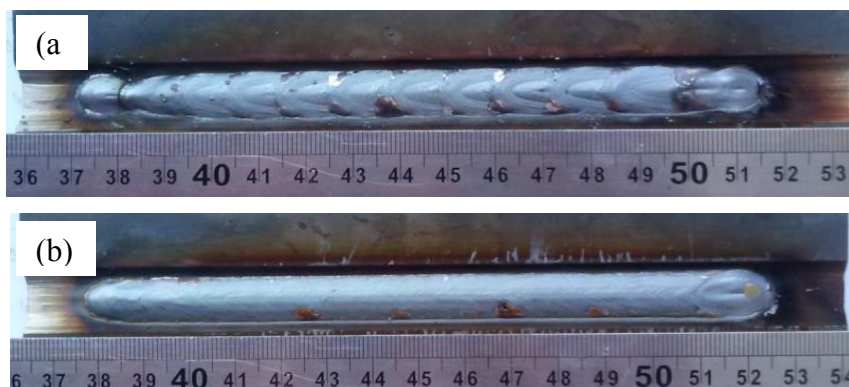


Figura 8.9 – Aspecto típico de cordões produzidos e submetidos a avaliação do ensaio mecânico Charpy: (a) com a técnica switchback; (b) sem a técnica

Tabela 8.3 – Energia absorvida pelas amostras soldadas durante o ensaio Charpy, para uma temperatura de 0°C

	Com Switchback				Sem Switchback			
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Energia Absorvida (J)	12,72	9,45	14,18	14,14	9,44	6,7	14,15	14,16
	8,48	8,8	7,9	14,02	12,93	8,43	14,25	8,76
	14,03	9,72	9	8,43	13,55	13,69	14,27	9,45
	6,9	10,46	14,12	8,48	6,9	7,31	8,48	8,8
	8,76	14,16	8,9	8,43	13,88	12,13	8,43	9,72
Média	10,18	10,52	10,82	10,7	11,34	9,65	11,92	10,18
Desvio	3,04	2,12	3,07	3,09	3,05	3,09	3,16	2,26
Média global	10,55				11,11			
Desvio Global	0,28				1,04			

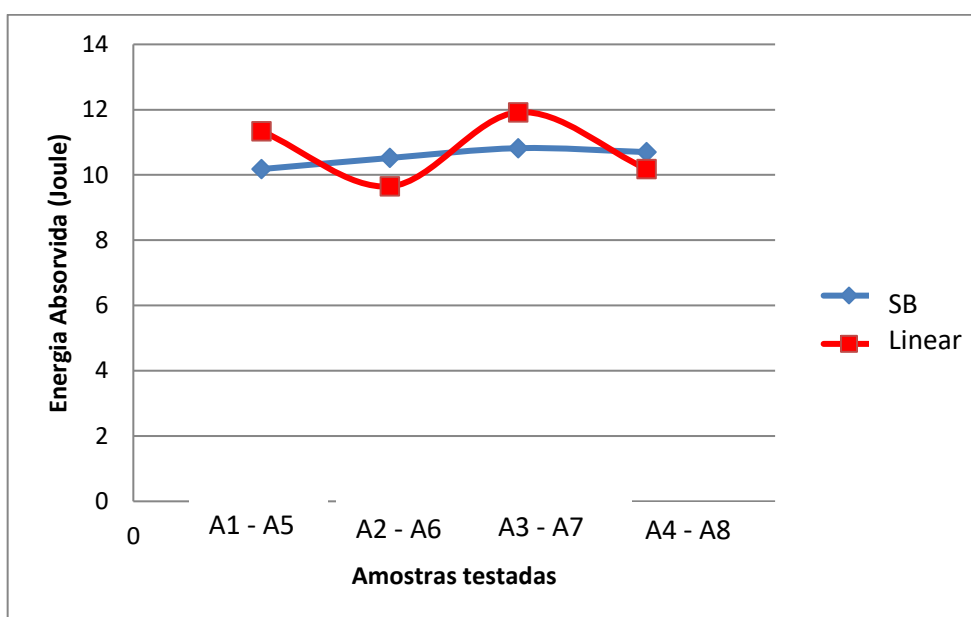


Figura 8.10 – Energia média absorvida no ensaio de impacto das amostras retiradas das soldas produzidas com a técnica switchback (SB) e sem o seu emprego (Linear), para uma temperatura de ensaio de 0°C

Resultado similar foi encontrado quando o ensaio Charpy foi realizado em temperatura sub-zero, ou seja, não foi verificada a diferença na energia média absorvida no impacto quando a técnica foi empregada. As médias globais obtidas foram de $0,41 \text{ J} \pm 0,01 \text{ J}$ com o emprego da técnica e de $0,43 \text{ J} \pm 0,03 \text{ J}$ sem o seu emprego (Tabela 8.4). A Figura 8.11 apresenta o comportamento obtido para a energia absorvida a temperatura sub-zero. Verifica-se, novamente, que as médias estão próximas e praticamente dentro da dispersão, quando se comparam o uso ou não da técnica, evidenciando a mesma igualdade estatística obtida para o caso anterior.

Este resultado não era esperado, uma vez que a região de recristalização no fundo do cordão foi observada. Talvez, o ensaio não apresentou a sensibilidade adequada para observar o efeito desta pequena região com recristalização na tenacidade do metal de solda. Outro fator importante que pode ter afetado os resultados foi o posicionamento do entalhe. Pode ser que, em alguns casos, o entalhe tenha sido fabricado para iniciar a propagação da trinca na ZTA e não exatamente no fundo metal de solda. Isto porque fica muito difícil, durante a fabricação do entalhe, observar se ele está exatamente no fundo do cordão, pois tem-se uma visão macroscópica e não microscópica. Além do mais, a penetração da solda fabricada com a técnica switchback não é uniforme, apresentando alguma pequena variação. Assim, mesmo que o entalhe tenha sido posicionado corretamente (Figura 8.5), em algum ponto do fundo do cordão o entalhe pode estar localizado na ZTA (ver Figura 8.6), afetando os resultados. Finalmente, pode-se dizer ainda

que mesmo com a observação da recristalização no fundo do cordão, foi verificado que a sua extensão ao longo do cordão não é uniforme, como mencionado anteriormente. Mas não menos importante foi o fato de não se ter medido a temperatura das amostras colocadas por 15 em nitrogênio líquido, que por experiência do operador devem ter chegado a $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Porém, tratava-se de amostras miniaturizadas e a temperatura alcançada por ter sido bem menor, o que levaria ambos materiais para condição de fratura frágil de baixa energia. Estes fatores certamente podem ter contribuído para dificultar evidenciar o efeito da recristalização na tenacidade dos cordões produzidos com a técnica switchback.

Tabela 8.4 – Energia absorvida pelas amostras soldadas durante o ensaio Charpy por placa de teste soldada, para uma temperatura sub-zero

	Com Switchback				Sem Switchback			
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
Energia Absorvida (J)	0,38	0,3	0,46	0,33	0,52	0,38	0,53	0,59
	0,53	0,35	0,49	0,31	0,34	0,45	0,4	0,37
	0,47	0,44	0,32	0,53	0,38	0,59	0,38	0,24
	0,58	0,41	0,44	0,34	0,59	0,5	0,43	0,29
	0,43	0,32	0,37	0,39	0,43	0,37	0,39	0,34
Média	0,48	0,36	0,41	0,38	0,45	0,46	0,43	0,37
Desvio	0,08	0,06	0,07	0,09	0,10	0,09	0,06	0,13
Média global	0,41				0,43			
Desvio global	0,01				0,03			

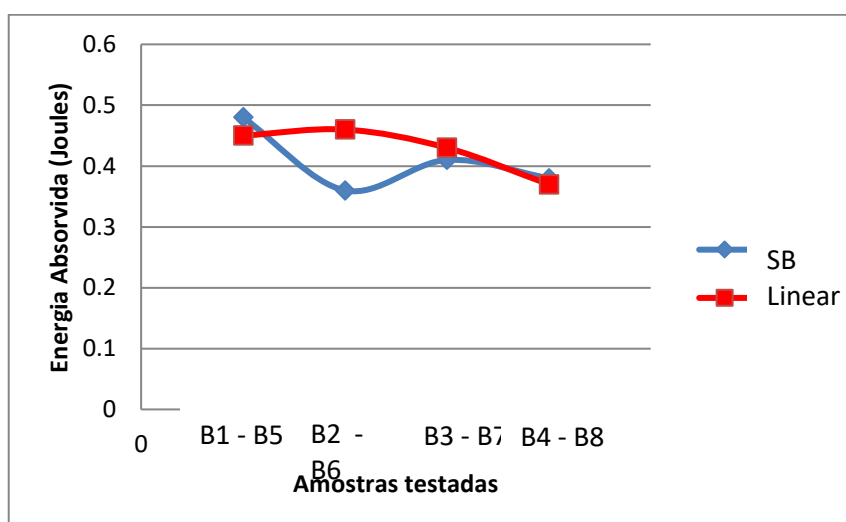


Figura 8.11 – Energia média absorvida no ensaio de impacto das amostras retiradas das soldas produzidas com a técnica (SB) e sem o seu emprego (Linear), para uma temperatura de ensaio sub-zero

As Figuras 8.12 e 8.13 apresentam as imagens das superfícies fraturadas das amostras avaliadas, para, respectivamente, as temperaturas de 0^oCe sub-zero. Nota-se, na Figura 8.12, o aspecto dúctil das fraturas (com e sem o emprego da técnica), pois observa-se claramente a deformação plástica (formação de uma superfície fibrosa), justificando as maiores energias absorvidas durante o ensaio de impacto. Já a Figura 8.13 apresenta um aspecto da fratura similar à do tipo frágil, uma vez que não foi observada, de forma nítida, regiões com grande deformação plástica. Isto justifica os baixos valores obtidos para a energia absorvida nesta temperatura. Não foi verificada diferença no aspecto da fratura com o emprego da técnica. Então, buscou-se observar, com um maior aumento, a superfície fraturada da região com recristalização (no fundo do cordão) e comparou-se com a fractografia obtida na região com grãos colunares (no centro do cordão), em uma mesma amostra produzida com a técnica e ensaiada a temperatura sub-zero. A Figura 8.14 mostra que a única diferença observada entre estas regiões foi o tamanho da área submetida a fratura frágil, pois na região colunar ocorre em uma maior extensão do grão do metal de solda, enquanto na região recristalizada ocorre em uma menor área do grão do metal de solda.

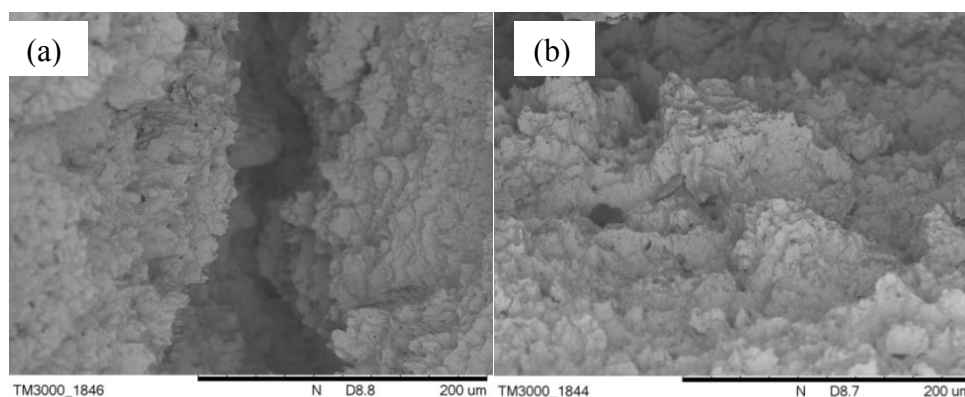


Figura 8.12 – Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das superfícies fraturadas na temperatura de 0^o C: (a) com a técnica e (b) sem a técnica

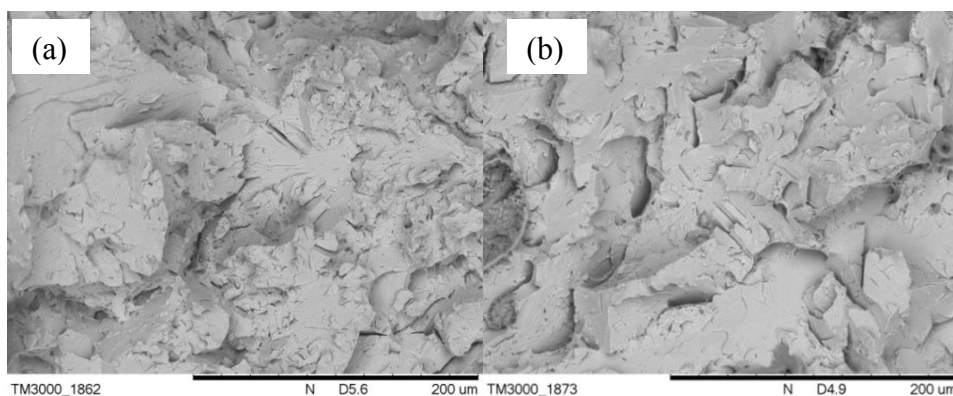


Figura 8.13 – Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das superfícies fraturadas na temperatura sub-zero: (a) com a técnica e (b) sem a técnica

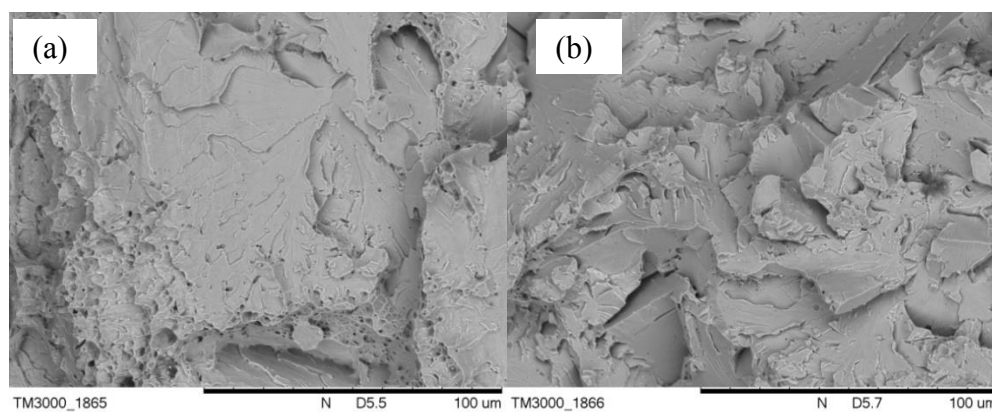


Figura 8.14 – Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de superfícies fraturadas em uma temperatura sub-zero, de uma amostra produzida com a técnica switchback: (a) região colunar e (b) região recristalizada

CAPÍTULO IX

Análise da Temperatura sob o Cordão de Solda Depositado com a Técnica Switchback

9.1 Introdução

Durante as soldagens MIG Pulsado sobre união de chapas finas com folga variável (CAPÍTULO V), foi observada uma maior tolerância à variação da folga quando a técnica switchback foi empregada. Além disso, a técnica favoreceu aumentar a velocidade limite de soldagem do processo MIG na soldagem de filetes em juntas sobrepostas na posição plana (CAPÍTULO VI), mantendo-se a qualidade geométrica da seção transversal do cordão produzido. Foi possível, ainda, manter a regularidade do cordão produzido neste mesmo tipo de junta, porém na posição sobre cabeça, com o emprego da velocidade limite de soldagem também maior (CAPÍTULO VII).

Acredita-se que a justificativa para tais feitos esteja num maior controle da poça de fusão, devido a um potencial aumento da viscosidade da poça de fusão por um menor aquecimento da mesma (a poça se mantém no lugar até solidificação, mesmo depois que o efeito de “ser empurrada” pelo arco em movimento já não esteja atuando). Assim, para buscar validar esta teoria novos experimentos foram planejados.

9.2 Metodologia

9.1.1 Bancada automatizada para soldagem com a técnica switchback

Todas as soldagens realizadas e descritas nos capítulos anteriores ocorreram de forma robotizada (seção 3.1 do Capítulo 3). Para a realização destes novos experimentos, foi usada uma outra montagem experimental existente no Laboratório de Soldagem da Universidade Federal do Pará (UFPA), com ilustrado na Figura 9.1. Ao invés de um robô, foram utilizados dois carros mecânicos de deslocamento da tocha, os quais foram posicionados de tal maneira que um deles foi montado sobre um trilho, tendo a única função de deslocar a tocha com a velocidade de soldagem imposta. O segundo carro foi posicionado sobre este primeiro, com a função de realizar o movimento de tecimento longitudinal (avanço e reversão). A combinação dos movimentos de deslocamento linear realizado com o primeiro carro e o de tecimento longitudinal pelo segundo, permitiu a realização das soldagens com a técnica switchback.



Figura 9.1 - Disposição de dois carros para a realização da técnica switchback de forma mecanizada (observe o carro de cima, que faz o movimento de tecimento longitudinal (para frente e para trás), montado sobre o carro de baixo que, sobre trilho, faz o movimento linear)

Os parâmetros da técnica quando comandada por robô são definidos diretamente numa interface de programação do sistema. Já para o arranjo desenvolvido, estes parâmetros são calculados a partir dos valores das variáveis reguladas diretamente na interface de cada

carro. Para uma melhor compreensão dos parâmetros envolvidos no arranjo, eles foram divididos em dois grupos. O primeiro grupo corresponde aos parâmetros impostos diretamente na interface dos carros, ou seja, as variáveis de entrada, a saber: a velocidade de soldagem (V_s), regulada na interface do carro de baixo; a frequência (f) e a amplitude (Amp) de tecimento longitudinal, reguladas na interface do carro de cima. O segundo grupo de parâmetros, por sua vez, consiste naqueles utilizados na técnica switchback, ou seja, as variáveis de saída: a distância de avanço (A); a distância de reversão (R); a velocidade de avanço (V_a); e a velocidade de reversão (V_r).

Para a determinação adequada dos parâmetros de entrada, obtidos em função dos parâmetros regulados na interface dos carros, tornou-se necessária a elaboração de uma planilha com cálculos de velocidades relativas. Para se exemplificar a determinação de um conjunto de parâmetros, toma-se as seguintes variáveis de entrada que foram usados nos experimentos: $f = 2$ Hz; Amp = 4 mm; e $V_s = 50$ cm/min (8,33 mm/s). Assim, tem-se agora de se determinar o segundo grupo de parâmetros, ou seja, aqueles utilizados na técnica switchback: a distância de avanço (A); a distância de reversão (R); a velocidade de avanço (V_a); e a velocidade de reversão (V_r).

O primeiro passo dos cálculos consiste em determinar a velocidade da tocha de soldagem, considerando apenas o seu movimento de tecimento longitudinal (V_t), ou seja, os parâmetros de regulação do carro de cima. Pode-se imaginar neste momento o carro de baixo parado. Para isso, deve-se considerar a distância percorrida pela tocha em um único ciclo, que corresponde ao trajeto de ida e volta a um mesmo ponto. Neste caso, basta multiplicar por dois a amplitude fornecida. Assim, a distância de tecimento longitudinal (D_t) é dada pela Equação 9.1.

$$D_t = 2 \times \text{Amp} = 2 \times 4 \text{ mm} = 8 \text{ mm} \quad (9.1)$$

Para se determinar V_t é necessário, ainda, o tempo no qual a tocha percorre um ciclo. Este tempo, que por ser cíclico é aqui definido como período (T), consiste no inverso da frequência de oscilação, conforme Equação 9.2.

$$T = 1/f = 1/2 = 0,5 \text{ s} \quad (9.2)$$

A velocidade de tecimento longitudinal dentro de um período é, então, a razão entre D_t e T , como na Equação 9.3.

$$V_t = D_t/T = 8 \text{ mm}/0,5 \text{ s} = 16 \text{ mm/s} \quad (9.3)$$

O segundo passo dos cálculos consiste na determinação da velocidade de avanço (V_a), calculada pela soma da velocidade V_t com a da velocidade de soldagem regulada no carro de baixo (V_s), conforme Equação 9.4,

$$V_a = V_t + V_s = 16 \text{ mm/s} + 8,33 \text{ mm/s} = 24,33 \text{ mm/s} = 146 \text{ cm/min} \quad (9.4)$$

A velocidade de reversão pode ser obtida pela Equação 9.5, como a diferença entre V_t e V_s .

$$V_r = V_t - V_s = 16 \text{ mm/s} - 8,33 \text{ mm/s} = 7,67 \text{ mm/s} = 46 \text{ cm/min} \quad (9.5)$$

Para a determinação das distâncias de avanço e de reversão separadamente deve-se calcular antes o tempo de movimento da tocha durante o avanço ou a reversão (a metade do período (T)), em um único ciclo. A Equação 9.6 fornece que este tempo (t).

$$t = T/2 = 0,5 \text{ s}/2 = 0,25 \text{ s} \quad (9.6)$$

As distâncias de avanço e de reversão são, portanto, os produtos das respectivas velocidades e tempos de movimento da tocha (avanço ou reversão), como o indicado pelas Equações 9.7 e 9.8.

$$A = V_a \times t = 24,33 \text{ mm/s} \times 0,25 \text{ s} = 6,08 \text{ mm} \quad (9.7)$$

$$R = V_r \times t = 7,67 \text{ mm/s} \times 0,25 \text{ s} = 1,91 \text{ mm} \quad (9.8)$$

Desta forma, ou seja, as variáveis de saída para a técnica switchback em função das dadas variáveis de entrada foram: distância de avanço (A) = 6,08 mm; distância de reversão (R) = 1.91 mm; velocidade de avanço (V_a) = 24,33 mm/s; e velocidade de reversão (V_r) = 7,67 mm/s (razão $A/R \approx 6/2$).

Porém, estes parâmetros do switchback não foram os mesmos usados no estudo anterior, ou seja, relação avanço-reversão ($A-R$) de 10-5 e 30-20, obtidas com uma velocidade equivalente de soldagem igual a 25 cm/min. Assim, usando esta metodologia para calcular as variáveis operacionais da técnica switchback, buscou-se variar a frequência e a amplitude de tecimento longitudinal do carro de cima com a finalidade de encontrar por

aproximação as condições desejadas. Os valores calculados para as velocidades de avanço e de reversão, bem como para os comprimentos de avanço e reversão, são observados nas Tabelas 9.1, 9.2 e 9.3, as quais estão apresentadas para, respectivamente, 1 Hz, 2 Hz e 3 Hz.

Por intermédio da Tabela 9.1, nota-se que não foi possível encontrar as condições estudadas mencionadas, sendo as condições A-R de 10-6 e 27-23 as mais próximas de, respectivamente, 10-5 e 30-20. Além disso, ressalta-se que as velocidades de avanço e reversão são diferentes, sendo 121 cm/min no avanço e 71 cm/min na reversão, para a condição 10-6, e 325 cm/min e 275 cm/min, respectivamente, no avanço e reversão, para a condição 27-23. Nas condições anteriormente estudadas mantiveram-se constantes as velocidades no avanço e reversão, sendo 74 cm/min, na condição 10-5, e 111 cm/min, na condição 30-20. A mesma observação é feita nas Tabelas 9.2 e 9.3, ou seja, não foi possível encontrar as condições da relação avanço-reversão estudadas.

Tabela 9.1 –Valores calculados das variáveis operacionais da técnica para uma velocidade equivalente de soldagem de 25 cm/min e 1 Hz de frequência de tecimento longitudinal

Amplitude (mm)	Distância tecimento (mm)	Veloc. de tecimento (cm/min)	Veloc. de Avanço (cm/min)	Veloc. de Reversão (cm/min)	Avanço (mm)	Reversão (mm)
4	8	48	73	23	6	2
5	10	60	85	35	7	3
6	12	72	97	47	8	4
7	14	84	109	59	9	5
8	16	96	121	71	10	6
9	18	108	133	83	11	7
10	20	120	145	95	12	8
15	30	180	205	155	17	13
20	40	240	265	215	22	18
25	50	300	325	275	27	23
30	60	360	385	335	32	28

Dessa maneira, buscou-se reduzir a frequência de tecimento longitudinal para valores menores do que 1Hz. Adotou-se, então, os valores de 0,8Hz e 0,4 Hz. Os resultados para os parâmetros da técnica switchback considerando esses novos valores de frequência são apresentados nas tabelas 9.4 e 9.5. Finalmente, foi possível achar os valores de frequência e amplitude de tecimento longitudinal que determinam as condições da relação avanço-reversão desejadas, ou seja, 0,8 Hz e 7,5 mm, para a relação 10-5, e 0,4 Hz e 25 mm, para a relação igual a 30-20. Ressalta-se, entretanto, que as velocidades de avanço e reversão,

para ambos os casos de frequências utilizadas, são ainda diferentes, sendo 97 cm/min no avanço e 47 cm/min na reversão, para a condição 10-5, e 145 cm/min no avanço e 95 cm/min na reversão, para a condição 30-20. Isso mostra a limitação do sistema mecanizado em relação ao robô empregado nos experimentos anteriores. Porém, acredita-se não comprometer a análise de temperatura sob o cordão, foco de estudo neste capítulo.

Tabela 9.2 – Valores calculados das variáveis operacionais da técnica para uma velocidade equivalente de soldagem de 25 cm/min e 2 Hz de frequência de tecimento longitudinal

Amplitude (mm)	Distância tecimento (mm)	Veloc. de tecimento (cm/min)	Veloc. de Avanço (cm/min)	Veloc. de Reversão (cm/min)	Avanço (mm)	Reversão (mm)
4	8	96	121	71	5	3
5	10	120	145	95	6	4
6	12	144	169	119	7	5
7	14	168	193	143	8	6
8	16	192	217	167	9	7
9	18	216	241	191	10	8
10	20	240	265	215	11	9
15	30	360	385	335	16	14
20	40	480	505	455	21	19
25	50	600	625	575	26	24
30	60	720	745	695	31	29

Tabela 9.3 – Valores calculados das variáveis operacionais da técnica para uma velocidade equivalente de soldagem de 25 cm/min e 3 Hz de frequência de tecimento longitudinal

Amplitude (mm)	Distância tecimento (mm)	Veloc. de tecimento (cm/min)	Veloc. de Avanço (cm/min)	Veloc. de Reversão (cm/min)	Avanço (mm)	Reversão (mm)
4	8	144	169	119	5	3
5	10	180	205	155	6	4
6	12	216	241	191	7	5
7	14	252	277	227	8	6
8	16	288	313	263	9	7
9	18	324	349	299	10	8
10	20	360	385	335	11	9
15	30	540	565	515	16	14
20	40	720	745	695	21	19
25	50	900	925	875	26	24
30	60	1080	1105	1055	31	29

Tabela 9.4 – Valores calculados das variáveis operacionais da técnica para uma velocidade equivalente de soldagem de 25 cm/min e 0,8 Hz de frequência de tecimento longitudinal

Amplitude (mm)	Distância tecimento (mm)	Veloc. de tecimento (cm/min)	Veloc. de Avanço (cm/min)	Veloc. de Reversão (cm/min)	Avanço (mm)	Reversão (mm)
7	14	67,2	92,2	42,2	10	4
7,5	15	72	97	47	10	5
8	16	76,8	101,8	51,8	11	5
8,5	17	81,6	106,6	56,6	11	6
10	20	96	121	71	13	7
15	30	144	169	119	18	12
20	40	192	217	167	23	17
25	50	240	265	215	28	22
25,5	51	244,8	269,8	219,8	28	23
26	52	249,6	274,6	224,6	29	23
26,6	53,2	255,36	280,36	230,36	29	24
30	60	288	313	263	33	27

Tabela 9.5 – Valores calculados das variáveis operacionais da técnica para uma velocidade equivalente de soldagem de 25 cm/min e 0,4 Hz de frequência de tecimento longitudinal

Amplitude (mm)	Distância tecimento (mm)	Veloc. de tecimento (cm/min)	Veloc. de Avanço (cm/min)	Veloc. de Reversão (cm/min)	Avanço (mm)	Reversão (mm)
7	14	33,6	58,6	8,6	12	2
7,5	15	36	61	11	13	2
8	16	38,4	63,4	13,4	13	3
8,5	17	40,8	65,8	15,8	14	3
10	20	48	73	23	15	5
15	30	72	97	47	20	10
20	40	96	121	71	25	15
25	50	120	145	95	30	20
25,5	51	122,4	147,4	97,4	31	20
26	52	124,8	149,8	99,8	31	21
26,6	53,2	127,68	152,68	102,68	32	21
30	60	144	169	119	35	25

9.1.2 Calibração do Arranjo dos Carros de Deslocamento

Os cálculos da seção 9.1.1 podem carregar duas fontes de erros. A primeira, inerente, portanto inevitável, se refere às acelerações e desacelerações ao de mudar o sentido de

movimento da tocha, não levado em consideração nos cálculos. A segunda fonte de erro seria a própria falta de repetitividade dos movimentos dos carros. Assim, optou-se por fazer uma calibração do sistema como um todo. Para tal, foram regulados diferentes valores de amplitude de avanço/reversão na interface do carro e, em seguida, com auxílio de papel milimetrado e uma caneta especial ajustada à extremidade da tocha de soldagem, mediu-se a amplitude real de tecimento longitudinal, com o carro de baixo parado (velocidade equivalente de soldagem igual a zero). A Tabela 9.6 indica os valores de amplitudes reguladas na interface e os reais, medidos no papel, compilados na Figura 9.2 como curva e equação de calibração. Nota-se que o coeficiente de inclinação da curva é menor do que 1, ou seja, a amplitude real é menor do que esperada, mas mantendo a mesma taxa de desvio. Este fato caracteriza um erro sistemático, passível de ser corrigido.

Tabela 9.6 - Calibração da amplitude de avanço/reversão no arranjo de deslocamento da tocha, com o carro de baixo parado

Amplitude regulada	Amplitude Real
0	0
5	4,40
10	8,55
15	12,90
20	17,25
25	21,35
30	25,60
35	29,75
40	34,10
45	38,35

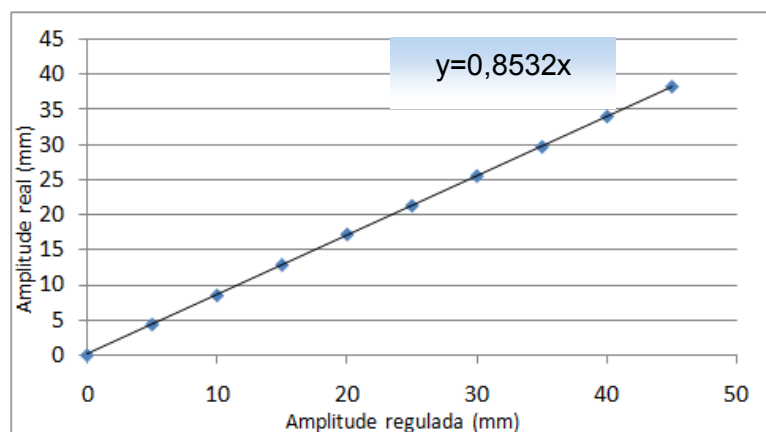


Figura 9.2 – Gráfico de calibração da amplitude

Pelo conceito da correção do erro sistemático, a partir do gráfico de calibração da figura 9.2 foi possível identificar os valores a serem regulados para a amplitude no carro de cima visando garantir a realização das soldas com relação avanço-reversão, ou seja, esses valores regulados foram 8,7 mm (para garantir o valor real da amplitude de 7,5 mm) e 29,3 mm (para garantir o valor real da amplitude de 25 mm), respectivamente para, desta maneira, alcançar as relações avanço-reversão de 10-5 e 30-20, respectivamente.

Em seguida, novamente com o carro de baixo parado, calibrou-se a frequência de tecimento longitudinal. Neste caso, foi regulado os valores de frequência em 0,5 Hz, 1Hz, 2Hz e, finalmente, 3 Hz. Cada valor de frequência foi calibrada para dois valores de amplitude, 5 mm e 45 mm. Esses valores de amplitude foram escolhidos pois representam o valor mínimo e máximo que podem ser regulados no carro de cima. Desta forma, foram adquiridos os tempos (em segundos), através de um cronometro digital, necessários para a realização de um ciclo de tecimento longitudinal, ou seja, este tempo representa o período para cada frequência estudada. Portanto, para as referidas frequências, os períodos adquiridos devem ser 2 s, 1 s, 0,5 s e 0,33, respectivamente, independentemente do valor adotado para a amplitude. A Tabela 9.7 mostra que o valor médio obtido para o período em cada condição de frequência avaliada manteve-se dentro do esperado (somente erros aleatórios), não necessitando realizar ajustes.

Para a verificação da velocidade equivalente de soldagem foi necessário movimentar todo o sistema mecanizado, ou seja, empregou-se uma determinada velocidade de soldagem no carro de baixo. Deve ser ressaltado que a velocidade equivalente consiste na velocidade de soldagem empregada na técnica switchback que permite a realização de um cordão de solda no mesmo tempo de confecção de outro cordão com mesmo comprimento, porém sem o emprego da técnica, ou seja, com deslocamento linear da tocha. Para o caso do sistema mecanizado, a velocidade equivalente de soldagem é regulada no carro de

baixo. Para a sua calibração, a velocidade equivalente de soldagem foi variada em 20 cm/min, 25 cm/min, 30 cm/min, 35 cm/min e 40 cm/min. Foi adquirido o tempo em cada uma dessas velocidades reguladas, em cinco medições, para um percurso da tocha igual a 200 mm. O resultado é visualizado na Tabela 9.8. Pode ser observado por intermédio desta tabela que as velocidades reais observadas com os tempos médios adquiridos permanecem inalteradas, mostrando não ser necessário realizar ajustes na velocidade equivalente regulada, no caso o valor de 25 cm/min utilizado nos experimentos.

Tabela 9.7 Calibração da frequência de tecimento longitudinal no arranjo de deslocamento automático da tocha, com o carro de baixo parado

Frequência (Hz)	0,5		1		2		3	
Amplitude (mm)	5	45	5	45	5	45	5	45
Tempo (s)	2,06	2,05	1,00	0,99	0,53	0,49	0,33	0,35
	1,94	2,00	1,06	0,99	0,53	0,48	0,33	0,29
	2,05	1,98	1,00	1,00	0,47	0,51	0,34	0,30
	2,00	2,05	1,01	0,99	0,55	0,54	0,33	0,33
	1,93	2,06	0,99	1,01	0,53	0,47	0,34	0,34
	2,04	2,04	1,05	1,01	0,55	0,49	0,32	0,33
	1,99	2,06	1,01	0,94	0,47	0,48	0,32	0,37
	2,01	2,06	1,02	1,01	0,49	0,49	0,35	0,34
	1,98	2,04	1,01	0,99	0,48	0,49	0,33	0,33
	2,00	2,05	1,08	1,01	0,55	0,54	0,29	0,34
	2,01	2,03	1,00	0,98	0,48	0,48	0,34	0,35
	2,00	2,04	1,01	1,01	0,49	0,49	0,33	0,33
	1,98	2,05	1,00	1,01	0,54	0,47	0,35	0,35
	1,98	2,05	0,99	0,98	0,49	0,55	0,33	0,33
	1,99	2,07	1,01	1,01	0,55	0,47	0,29	0,35
	2,01	2,04	1,07	1,00	0,47	0,49	0,35	0,35
	1,99	2,04	1,06	1,01	0,53	0,50	0,33	0,34
	1,99	2,06	0,94	1,01	0,47	0,53	0,29	0,33
	2,02	1,99	1,08	1,02	0,47	0,49	0,33	0,34
	2,01	2,03	1,00	1,00	0,54	0,49	0,34	0,33
Tempo (s) Médio	2,0	2,05	1,01	1,01	0,51	0,49	0,33	0,34

Tabela 9.8 - Calibração da velocidade equivalente de soldagem regulada no carro de baixo para um espaço percorrido pela tocha igual a 200 mm

Velocidade regulada no carro de baixo (cm/min)	Tempo(s)					Tempo médio (s)	Velocidade real (cm/min)
	t1	t2	t3	t4	t5		
20	60,03	60,21	60,22	60,23	60,47	60,23	19,6
25	47,67	48,19	48,14	48,10	48,24	48,07	24,5
30	39,27	40,05	40,09	40,08	40,06	39,91	29,5
35	34,44	34,34	34,34	34,19	34,45	34,35	34,5
40	30,01	29,96	30,21	30,42	30,15	30,15	39,5

9.3 Resultados e Discussões

Para a realização dos novos testes, buscou-se manter os parâmetros operacionais utilizados nos experimentos realizados anteriormente no Laprosolda-UFU. Assim, as soldagens foram realizadas com o processo MIG Pulsado sobre chapas de aço carbono ABNT 1020 de 4,7 mm de espessura, na posição plana e em simples deposição, mantendo-se a corrente constante em 150 A, mistura gasosa 98% Ar + 2% O₂, vazão do gás 15 l/min e DBCP igual a 18 mm. Foram realizadas soldagens com a técnica switchback em duas condições da relação avanço-reversão, 10-5 e 30-20. Para a produção das soldas com comprimento de avanço igual a 10 mm e comprimento de reversão de 5 mm, as regulagens da amplitude e frequência foram, respectivamente, iguais a 7,5 mm e 0,8 Hz. Já para a realização das soldas com 30 mm de avanço e 20 mm de reversão os valores regulados para a amplitude e frequência foram, respectivamente, 25 mm e 0,4 Hz, de acordo com as Tabelas 9.4 e 9.5. A velocidade equivalente de soldagem foi mantida em 25 cm/min. Finalmente, soldagens MIG Pulsado sem o emprego da técnica foram produzidas para efeito de comparação.

Após as soldagens, foram analisadas a estrutura de solidificação dos cordões produzidos, bem como o perfil da temperatura máxima alcançada e registrada sob o cordão de solda, a partir de uma câmera termográfica posicionada sob as placas de teste.

9.3.1 Estrutura de solidificação do cordão produzido

As Figuras 9.3.1 e 9.3.2 ilustram a estrutura de solidificação do cordão, na seção longitudinal, produzidos nas condições da relação avanço-reversão iguais a 10-5 e 30-20.

Verifica-se nessas figuras a presença de grãos com morfologia equiaxial, localizados próximo à linha de fusão, no fundo do cordão. O mesmo comportamento foi encontrado em testes já realizados anteriormente (seção 4.3), confirmando que a técnica tem influência sobre a formação da estrutura de solidificação da solda.

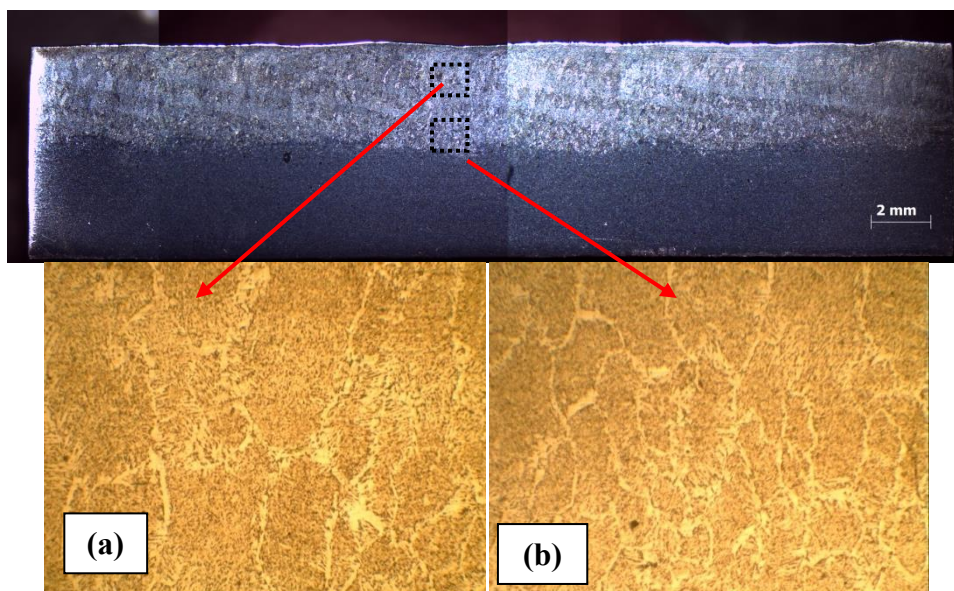


Figura 9.3.1 - Estrutura de solidificação obtida em seção longitudinal do metal de solda produzido com a técnica switchback na condição 10-5: (A) Grãos colunares, na região central entre a linha de solidificação e a superfície do cordão; (B) Grãos com tendência equiaxial, com característica de recristalização, sob a linha de fusão

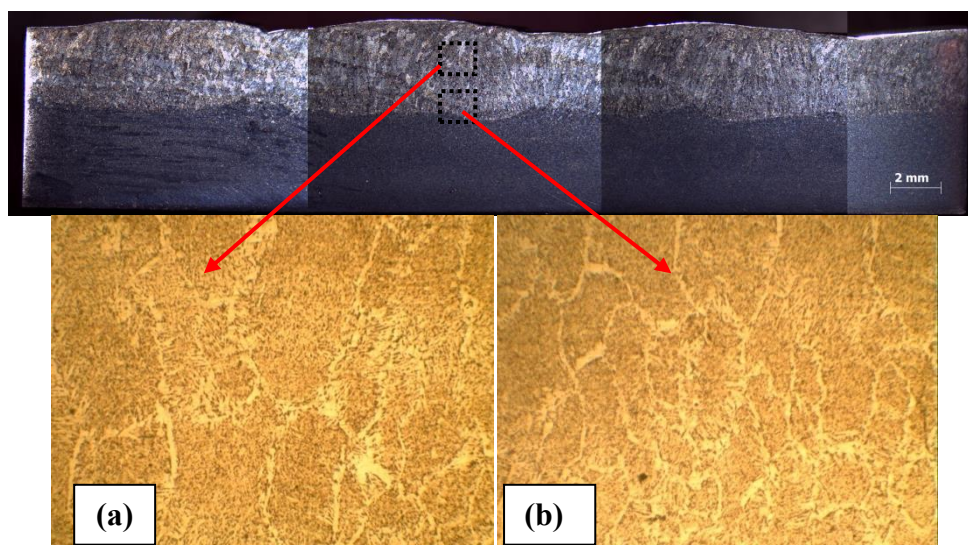


Figura 9.3.2 - Estrutura de solidificação obtida em seção longitudinal do metal de solda produzido com a técnica switchback na condição 30-20: (a) Grãos colunares, na região central entre a linha de solidificação e a superfície do cordão; (b) Grãos com tendência equiaxial, com característica de recristalização, sob a linha de fusão

9.3.2 Análise da Temperatura sob o cordão

As Figuras 9.3.3 e 9.3.4 apresentam, respectivamente, os aspectos superficial e geométrico dos cordões produzidos. Percebe-se na primeira figura a regularidade superficial dos cordões, sendo notável o aspecto liso para a solda produzida sem o emprego da técnica (Figura 9.3.3(a)) e o aspecto escamoso obtido com o seu emprego (Figuras 9.3.3(b) e (c)), o qual é característico devido as inúmeras reversões do arco durante a deposição do metal de solda. Na segunda imagem, observa-se que a geometria das soldas obtidas com o processo MIG Pulsado manteve-se praticamente inalterada quando a técnica switchback foi empregada. A penetração dos cordões foi muito semelhante, sendo isso importante para a análise da temperatura sob o cordão com o auxílio da câmera termográfica.

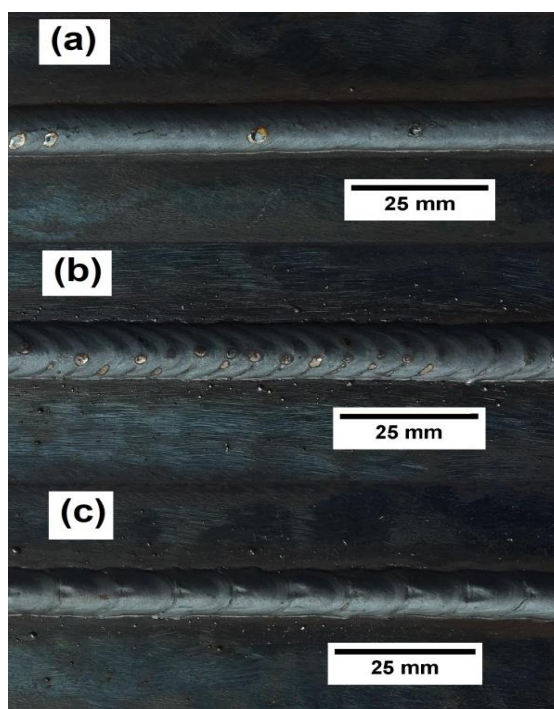


Figura 9.3.3 – Aspecto superficial dos cordões de solda produzidos nas soldagens MIG Pulsado: (a) sem switchback (linear); (b) switchback 10-5; e (c) switchback 30-20

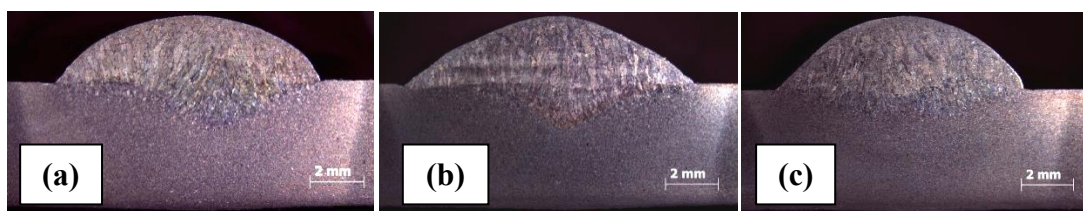


Figura 9.3.4 - Seção transversal dos metais de solda produzidos nas soldagens MIG Pulsado: (a) Linear; (b) Switchback 10-5; e (C) Switchback 30-20

Através da Figura 9.3.5, observa-se o comportamento do valor médio das temperaturas máximas obtidas sob as placas de teste soldadas. Nota-se que os menores níveis de temperatura máxima alcançadas ocorreram para os cordões produzidos com a técnica switchback, sendo ainda menor para a condição 30-20. Os menores valores de temperatura máxima observados nesta condição podem ser justificados pelas maiores velocidades de soldagem empregadas na tocha, bem como maiores tempos para esfriamento devido aos maiores comprimentos de avanço e reversão, o que pode favorecer as maiores variações de temperatura máxima observada na referida figura. Chama-se atenção, porém, que estes valores, apesar de seguirem uma tendência lógica, são muito próximos. Mas deve-se lembrar que estas temperaturas foram medidas na face de baixo da chapa, portanto longe do cordão. O calor tinha de atravessar mais da metade da espessura da chapa para aquecer essa face. Assim, o calor espalha a um certo nível antes de chegar na face oposta. Pode-se, assim, imaginar que estas diferenças seriam maiores se estivesse medindo a temperatura no pé do cordão.

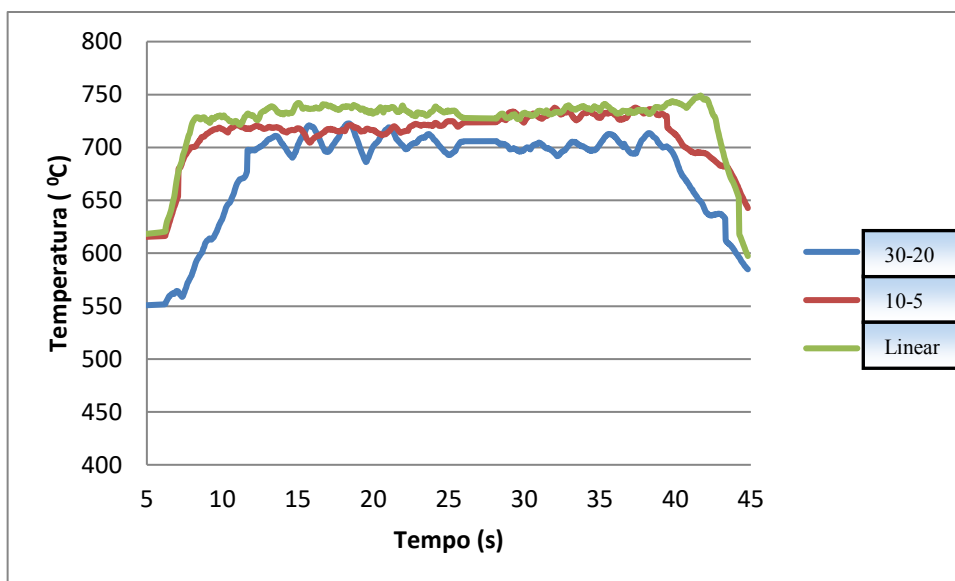


Figura 9.3.5 – Perfil representativo dos valores médios das temperaturas máximas obtidas sob os cordões produzidos na condição sem switchback (linear) e com switchback com dois valores de A-R

Este resultado é relevante e possibilita, com isso, manter a hipótese de que a viscosidade da poça de fusão é maior quando a técnica switchback é empregada, justificando o seu potencial verificado no controle da penetração do cordão, ou seja, o emprego da técnica permite criar condições favoráveis para o rápido resfriamento da poça de fusão, controlando a raiz da junta. Outro fato interessante a ser analisado são as

isotermas apresentadas na Figura 9.3.6. A região vermelha indica os maiores níveis de temperatura obtida durante a soldagem, podendo ser associada à área que corresponde ao tamanho aproximado da poça de fusão. Nota-se que esta região apresentou menores dimensões quando a técnica foi empregada, sendo menor na condição da relação avanço-reversão igual a 30-20 (mantendo-se as tendências esperadas). Isso é outro fator relevante, pois quanto menor o tamanho da poça de fusão maiores as chances de se conseguir o controle da penetração do cordão, o que está de acordo com Kaneko et al. (2007).

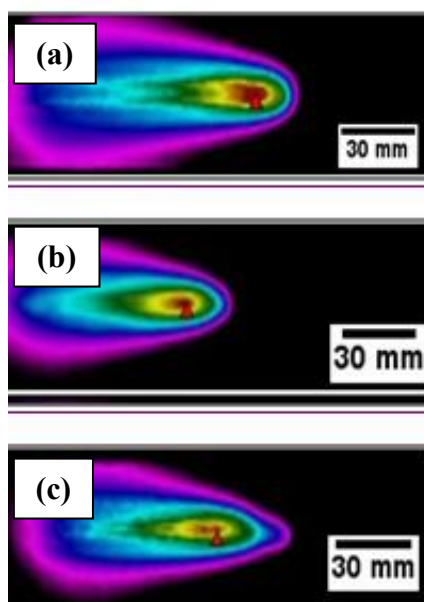


Figura 9.3.6 – Isotermas obtidas sob os cordões, aproximadamente na região central. A isoterma em vermelho sugere o tamanho da poça de fusão: (a) sem switchback (linear) com temperatura máxima média igual a 740 °C; (B) switchback 10-5; com temperatura máxima média igual a 720 °C e (C) switchback 30-20 com temperatura máxima média igual a 700 °C.

Observando os resultados obtidos em experimentos anteriores, verifica-se que a geometria da seção transversal do metal de solda produzido com a técnica (sobre juntas sobrepostas na posição plana e filete sobrecabeça) apresenta-se regular mesmo com a utilização de altas velocidades equivalente de soldagem, diferentemente das soldas produzidas sem o seu emprego, como indicado nas Figuras 9.3.7 e 9.3.8. Isto indica que mesmo com a maior viscosidade apresentado pelo metal líquido, ao mesmo tempo a técnica possibilita distribuir melhor o calor do arco, possibilitando o estabelecimento de fluidez necessária para garantir a regularidade geométrica dos cordões produzidos.

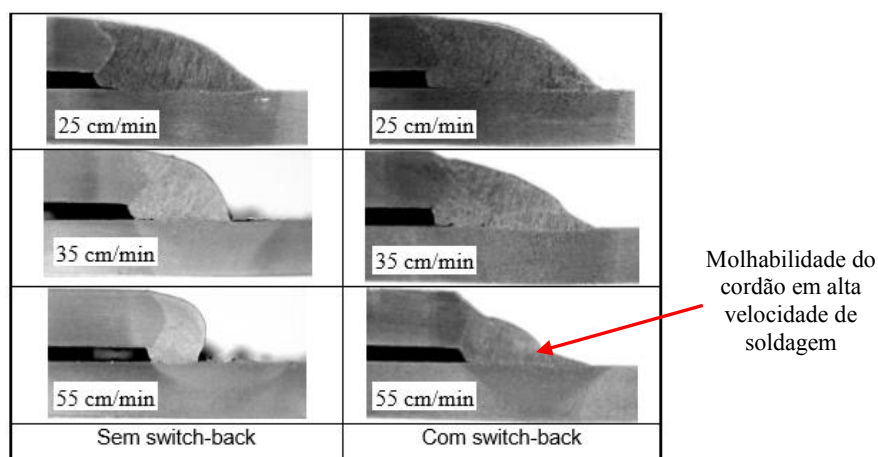


Figura 9.3.8 - Ilustração da seção transversal do metal de solda produzido em juntas sobrepostas (posição plana) com e sem o emprego da técnica switchback

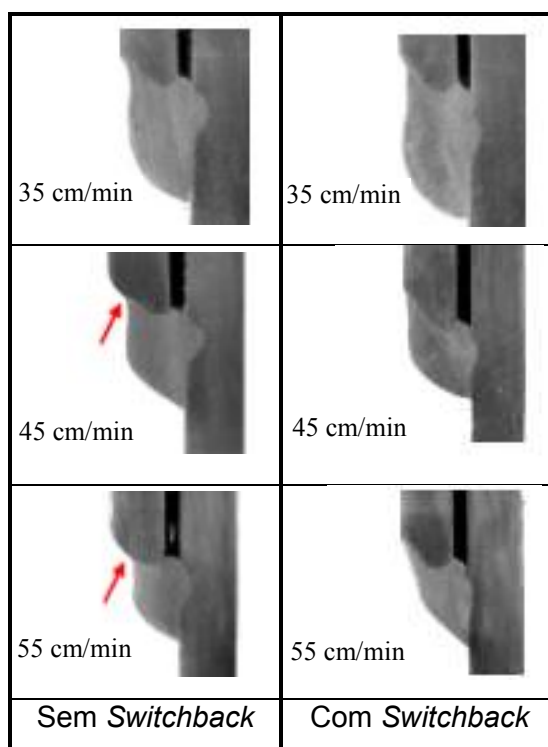


Figura 9.3.9 - Ilustração da seção transversal do metal de solda produzido em juntas sobrepostas na posição filete sobrecabeça com e sem o emprego da técnica switchback

9.4 CONCLUSÃO

Conclui-se com os experimentos realizados neste capítulo que a técnica permite reduzir a temperatura máxima obtida sob o cordão, possibilitando o aumento da viscosidade da poça de fusão. Isto explica a robustez da técnica no controle da penetração dos cordões

produzidos. Além disso, as reversões favorecem a uma melhor distribuição do calor do arco sobre o metal depositado, garantindo a fluidez necessária para o controle da geometria do cordão, mesmo com o emprego de altas velocidades equivalentes de soldagem. As menores temperaturas são alcançadas com o aumento dos comprimentos de avanço e reversão.

CAPÍTULO X

Conclusões

O objetivo do presente trabalho foi o de investigar o efeito dos parâmetros da técnica *Switchback* sobre a estrutura de solidificação do cordão obtido na soldagem MIG/MAG, visando potenciais alterações metalúrgicas de recristalização de parte do cordão (melhoria da tenacidade) e exercer o controle da poça de fusão (efeitos sobre a robustez da formação do passe de raiz, da soldagem fora de posição e aumento da velocidade limite de soldagem). Limitadas para as condições de soldagem (MIG pulsado com corrente média de 150 A, protegido por um gás com composição média de Ar+5%O₂) e matérias (arame e chapas de aço comum ao carbono) empregadas, as conclusões foram:

- É possível com o uso da técnica switchback se obter cordões parcialmente recristalizado, cuja proporção é determinada pelos parâmetros do switchback:
 - O comprimento de reversão é um parâmetro governante na formação da recristalização, sendo que quanto mais longo, mais fina é a estrutura de solidificação observada. Porém, há uma limitação de tamanho do comprimento de reversão, pois a partir de um certo valor a geometria do cordão fica prejudica.
 - A inclinação da tocha também toma uma importante parte na formação da recristalização, sendo o modo empurrando-puxando é o mais favorável;
- A técnica mostrou ainda ter potencial em promover o controle da poça de fusão:
 - Esse controle se justificou por uma menor temperatura da poça ao se usar a técnica switchback, o que faria aumentar a viscosidade do metal fundido;

- A tolerância para abertura da junta (de juntas de topo com chanfro em “I”) torna-se maior sem o risco de perfuração do passe de raiz, mas depende dos parâmetros de switchback (robustez favorecida com uma relação avanço-reversão de 10-5 mm, com uma velocidade de avanço cerca de 13% menor do que a velocidade de reversão e com menor velocidade equivalente de soldagem);
- soldagem de filete na posição sobrecabeça em juntas sobrepostas se torna mais fácil, permitindo aumentar a velocidade limite do cordão sem colapso do mesmo;
- a técnica também promove um aumento significativo da velocidade limite de soldagem em soldagens de juntas sobrepostas e na posição plana.

CAPÍTULO XI

Sugestões para Trabalhos Futuros

As sugestões aqui apresentadas têm a finalidade de ampliar o campo de aplicação deste trabalho, além de esclarecer e confirmar pontos que não puderam ser totalmente resolvidos. Por isso, fazem parte da proposta da continuidade deste estudo:

- a) Otimizar parâmetros do processo de soldagem, como variar o ângulo de inclinação da tocha, e da técnica (comprimentos de avanço e reversão, velocidades de avanço e reversão) com a finalidade de aumentar a área de recristalização no fundo do cordão;
- b) Repetir a realização do ensaio charpy, com alguma modificação do procedimento aqui realizado, para avaliar a tenacidade dos cordões produzidos com a técnica;
- c) Realizar um estudo sobre as características econômicas do processo MIG Pulsado com o emprego da técnica e das características geométricas do cordão produzido;
- d) Finalmente, avaliar o potencial da técnica switchback na soldagem automatizada de tubulações.

CAPÍTULO XII

Referências Bibliográficas

ADAMIAK, S.; The Remelting of C90U Steel with Using GTAW Method. Archives of Foundry Engineering, v. 7, Issue 3 / 2007.

ADAMIAK, S., Structure of carbon steels after remelting of the surface layer with the electric arc. Archives of Foundry Engineering, v. 9, p. 181-184, Issue 2/2009.

ADAMIAK, S., Microhardness and tribological wear of the steels remelted with an electric arc. Archives of Foundry Engineering, v. 9, p. 177-180, Issue 2/2009.

ALBUQUERQUE, M. C. S.; MACIEL, T. M.; SANTOS, M. A. e LIMA, I. E. Avaliação das Propriedades Mecânicas de uma Junta Soldada de uma Tubulação de Aço API 5L-X60. Soldagem & Inspeção, Ano 8, No. 3, Março, 2003.

ALMEIDA, H. A. L., SCOTTI, A., MOTA, C. A. M. da, Efeitos do Comprimento de Reversão e do Ângulo de Ataque sobre a Estrutura de Solidificação do Cordão em Soldagem MIG/MAG com "Switch Back", Soldagem e Inspeção, São Paulo, Vol.17, Nº. 2, p.123-137, Abr/Jun 2012

<https://doi.org/10.1590/S0104-92242012000200006>

ALORAIER, A.S., IBRAHIM, R.N., and GHODE, J.. Eliminating post-weld heat treatment in repair welding by temper bead technique: role bead sequence in metallurgical change.

Journal of Materials Processing Technology, 153–154 (2004) 392–400

ANDRADE, A. F. C., Influência da Corrente de Pulso, Tempo de pulso e Diâmetro de Gota sobre a Estabilidade da Transferência Metálica no Processo MIG-P. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, 107 f., Universidade Federal de Natal, Rio Grande do Norte, Brasil, 2012

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.383>

ASTM: E 23–02a, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, United States.

AWS Welding process, Welding Handbook, 8th ed., vol.2, Miami, 1992

BABU, S. S. The mechanism of acicular ferrite in weld deposits. Current Opinion in Solid State and Materials Science, v.8, p. 267–278, 2004.

<https://doi.org/10.1016/j.cossms.2004.10.001>

BABU, S. S. and BADESHIA, H. K. D. H.. Mechanism of the transition from Bainite to Acicular ferrite, Materials Transactions, v. 32, N° 8, p. 679 – 688, 1991.

<https://doi.org/10.2320/matertrans1989.32.679>

BOCHNOWSKI, W. The influence of the arc plasma treatment on the structure and microhardness C120U carbon tool steel, Archives of Foundry Engineering, v. 10, p. 331-334, Issue 1/2010.

BRADSTREET, B. J.: Welding Journal. v. 47, p. 314s–322s, 1968.

BRUECKER, D., Increasing travel speed with pulsed MIG/MAG switch-back welding on lap joint. Relatório Interno LAPROSOLDA/UFU.n. 16, 2007.

BARRA, S. R. Influência do processo MIG/MAG térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida. 2003. 209 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CHOI, H. W., FARSON D. F. and CHO, M. H.. Using a Hybrid Laser Plus GMAW Process for Controlling the Bead Humping Defect, Welding Research, p. 174 – 179, August, 2006

FAIRCHILD, D. P.; et al. - Study Concerning Intercritical HAZ Microstructure and Toughness in HSLA Steel - Welding Journal – dez - 1991- p.321s-329s

FURUYA, H., AIHARA, S. e MORITA,K., A New Proposal of HAZ Toughness Evaluation Method — Part 1: HAZ Toughness of Structural Steel in Multilayer and Single-Layer Weld Joints, Supplement to the welding journal, January, 2007

GHOSH, P.K., DORN, L., KULKARNI, S., HOFMANN, F., Arc characteristics and behaviour of metal transfer in pulsed current GMA welding of stainless steel

GRATZKET, U., KAPADIAT, P. D., DOWDEN, J., KROOS, J. and SIMON, G. Theoretical approach to the humping phenomenon in welding processes, p. 164 - 1647. 1992

<https://doi.org/10.1088/0022-3727/25/11/012>

GUO, N., LIN, S. B., ZHANG, L. e YANG,C. L., Metal transfer characteristics of rotating arc narrow gap horizontal GMAW. Science and Technology of Weldingand Joining. 2009, vol. 14, nº 8, p. 760 – 764.

<https://doi.org/10.1179/136217109X12505932584655>

ILKA, S.I., Estudo da influência da microestrutura sobre o comportamento mecânico de juntas soldadas de um aço estrutural. 1996. Dissertação. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, SP.

JOSEPH, A., FARSON, D., HARWIG, D. AND RICHARDSON, R., Influence of GMAW-P current waveforms on heat input and weld bead shape, v. 10, Nº 3, p. 311 – 318, 2005.

<https://doi.org/10.1179/174329305X40624>

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

KARADENIZ, E., OZSARAC, U. and YILDIZ, C., The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes, Materials and Design, vol 28, p. 649-656, 2007.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.07.014>

KOU, S., Welding metallurgy, 2a ed. John Wiley & Sons, 2003.

<https://doi.org/10.1002/0471434027>

KOVALENKO, O., SKHABOVSKIY, I., ZIBEROV, M., Reis, R.P., SCOTTI, A., Aplicação e Avaliação de Novas Técnicas de Revestimentos por Soldagem MIG/MAG, XXXIXCONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem, ABS, 25-28 Nov 2013, Curitiba, PR, 12 p.

KUO, C.W., Yang, S.M., CHEN, J.H., LAI, G.H. and WU, W., Study of vibration welding mechanism. Science and Technology of Welding and Joining, v.13, No 4, 2008.

<https://doi.org/10.1179/174329308X299959>

LINNEART, G. E.. Welding Metallurgy – carbon and Alloy Steels, Welding Handbook, Third Edition, V.1, USA.

LU, S., WEI, S., LIU, Z., LI, D. and LI, Y., Effects of Normalizing Process on the Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Low Carbon Steel Weld Metal with Niobium Addition. ISIJ International, Vol. 50 (2010), No. 2, pp. 248–254

<https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.248>

MENDEZ, F. P. and EAGAR, T. W., Penetration and Defect Formation in High-Current Arc Welding, Welding Research, p. 296-306, october, 2003

<https://doi.org/10.2172/835707>

NGUYEN, T. C., Weld defects in high-speed gas metal arc welding, 2005, PhD thesis, University of Waterloo, Canada.

NGUYEN, T. C., WECKMAN, D. C., JOHNSON, D. A. and KERR, H. W., The humping phenomenon during high speed gas metal arc welding, Science and Technology of Welding and Joining, V. 10, p. 447–459, 2005

<https://doi.org/10.1179/174329305X44134>

NOWACKI, J. and WYPYC., A., Application of thermovision method to welding thermal cycle analysis, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol 40, ISSUE 2, June, 2010

PALANI, P.K, MURUGAN, N., Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding, Journal of Materials Processing Technology, p. 1–10, 2006.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.07.013>

PRATES, M. e JOHN, G., Solidificação e Fundição dos Metais e suas ligas.

PRAVEEN, P., YARLAGADDA, P. K. D. V, KANG, M. J., Advancements in pulse gas metal arc welding, Journal of Materials Processing Technology, 1113–1119, 2005.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.100>

REIS, R. P. e SCOTTI, A., Avaliação do efeito do gás na velocidade de soldagem do processo plasma “melt-in” – parte 2, 15º POSMEC, Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

RETTENMAYR, M., Melting and remelting phenomena, International Materials, V. 54, N° 1, 2009.

<https://doi.org/10.1179/174328009X392930>

SAMUELS, L. E., Optical microscopy of carbon steels, 1992, Ohio.

SAVAGE, W. F., NIPPLES, E. F. and AGUSA, K. - Welding Journal - p. 212–224 - 1979

SCOTTI, A., Soldabilidade de aço ao Nb a Arco Submerso em altas Velocidades com Consumíveis Nacionais, Dissertação de Mestrado, Florianópolis, SC, Marco, 1982

SCOTTI, A. e PONOMAREV, Soldagem MIG/MAG, Melhor entendimento, melhor desempenho, 1ª edição, Artlíber Ed., SP, 2008, 284 p

SCOTTI, A., Reis, R.P., SKHABOVSKIY, I., KOVALENKO, O., ZIBEROV, M., Aparelho Configurado para Soldagem MIG/MAG Automatizada de Passes de Raiz e Método de Soldagem MIG/MAG Automatizada, Patente nacional de invenção, Depositantes: Universidade Federal de Uberlândia (UFU), VALE S.A., Fapemig, Número do Processo: BR 10 2015 030119 7, Petição 870150006031, de 01/12/2015

SCHWEDERSKY, M. B., DUTRA, J. C..Soldagem TIG de Elevada Produtividade: Influência dos Gases de Proteção na Velocidade Limite para Formação de Defeitos. XXXVI

CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem, Recife, PE, outubro, 2010.

<https://doi.org/10.1590/S0104-92242011000400004>

SILVA, A. R., MARQUES, P. V., BRACARENSE, A. Q. Aplicação de uma técnica variante da dupla camada na soldagem do aço 5%Cr – 0,5% Mo, 2001 Disponível em: WWW.infosolda.com.br/downloads/15dda.

SODRÉ, R. M., Aspectos metalúrgicos e do Comportamento Mecânico de soldas de Níquel depositadas pelo Processo MIG Pulsado utilizando a técnica Switchback, Dissertação, de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Para, Belém, PA, Brasil, 2018.

SUN, Z., KUO, M., ANNERGREN, I., and PAN, D., Effect of dual torch technique on duplex stainless steel welds, Materials Science and Engineering, p. 274-282, 2003.

[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00139-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00139-4)

SURESH, M. V., KRISHNA, B. V., VENUGOPAL, P. and RAO, K. P., Effect of pulse frequency in gas tungsten arc welding of powder metallurgical performs, Science and Technology of Welding and Joining, V. 9, No. 4, 2004.

<https://doi.org/10.1179/136217104225012238>

SVENSSON, Lars-Erik, Control of Microstructures and Properties in Steel Arc Welds. Sweden, 1994.

TEIXEIRA, F. R., Explorando a Potencialidade do processo GMAW Switchback para revestimento de um aço BLAR com liga de Níquel. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, 144 f., Universidade Federal do Pará , Belém, PA, Brasil, 2018.

TWEED, J. H. and KNOTT, J. F., Effect of reheating on microstructure and toughness of C-Mn weld metal Metal, Science, V. 17, February, 1983.

<https://doi.org/10.1179/030634583790427603>

WU, C.S., CHEN, M. A. and LU, Y. F., Effect of current waveforms on metal transfer in pulsed gas metal arc welding, Measurement Science and Technology, 2459–2465, 2005.

<https://doi.org/10.1088/0957-0233/16/12/009>

WEI, S. and LU, S., Effects of multiple normalizing processes on the microstructure and mechanical properties of low carbon steel weld metal with and without Nb, *Materials and Design*, vol. 35, p. 43-54, 2012

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.065>

YAMANE, S.; YOSHIDA, T. e YAMAMOTO, H., In Process Control of Weld Pool using Weaving Control in Switch-Back Welding, IIW, Doc XII-1949-08.

YAMANE, S. et al. Torch Weaving and Feed-Forward Control of Back Bead in One Side Backing less V Groove Welding by using SwitchBack Welding. IIW. Doc XII-1931-07.

YAMANE, S. et al., Adaptative Control of back bead in V groove welding without backing plate, *Science and Technology of welding and Joining*, 2004, Vol. 9, nº 2.

<https://doi.org/10.1179/136217104225017044>

YANG, C.L., GUO, N., LIN, S. B., FAN, C. L., e ZHANG, Y. Q. Application of rotation arc system to horizontal narrow gap welding. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2009, vol. 14, nº 2, 172 – 177.

<https://doi.org/10.1179/136217108X388651>

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br

**ATA****ATA DE DEFESA DE TESE****NÚMERO DE ORDEM: 255****DATA: 30/11/2018**

Às quatorze horas do dia trinta de novembro de dois mil e dezoito, na Sala 313 - Bloco 1M, Campus Santa Mônica, reuniu-se a Banca Examinadora composta pelos professores Dr. Américo Scotti (Orientador), Dr. Douglas Bezerra de Araújo e Dr. Louriel Oliveira Vilarinho, da Universidade Federal de Uberlândia, Dr. Carlos Alberto Mendes da Mota (Coorientador), da Universidade Federal do Pará, Dra. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos, da Universidade Federal de Pernambuco, e Dr. Altino de Jesus Roque Loureiro, da Universidade de Coimbra/Portugal, para, sob a presidência do primeiro, desenvolver o processo de avaliação da tese intitulada ***"Avaliação de Potencialidades da Soldagem MIG/MAG Automatizada Utilizando a Técnica Switchback"***, apresentada pelo aluno **HÉLIO ANTÔNIO LAMEIRA DE ALMEIDA**, matrícula número **11513EMC003**, em complementação aos requisitos determinados pelo Regimento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica para obtenção do título de Doutor. Após discorrer sobre seu trabalho, o candidato foi arguido pelos membros da Banca, diante das comunidades universitária e externa. Em seguida, a tese foi avaliada em seção privada pelos membros da Banca que, ao encerrar o processo, consideraram-na:

() Aprovada

(X) Aprovada com modificações a serem submetidas para a aprovação do orientador

() Aprovada com modificações a serem submetidas para a aprovação da banca

() Reprovada

conferindo ao aluno, em caso de aprovação, o título de Doutor em Engenharia Mecânica, Área de Concentração: **Materiais e Processos de Fabricação**; Linha de Pesquisa: **Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)**. As demandas complementares observadas pelos examinadores deverão ser satisfeitas no prazo máximo de 30 dias, para dar validade a esta aprovação. Para constar, lavrou-se a presente ata, que vai assinada pelo presidente e demais membros da Banca, com exceção do Prof. Altino de Jesus Roque Loureiro que por ser estrangeiro e não possuir número de CPF não teve seu cadastro no SEI efetivado, razão pela qual não assina digitalmente este documento.

Membros:

Prof. Dr. Américo Scotti (orientador) - UFU

Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes da Mota (coorientador) - UFPA

Prof. Dr. Douglas Bezerra de Araújo - UFU

Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho - UFU

Profa. Dra. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa - CEFET-MG

Prof. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos - UFPE

Prof. Dr. Altino de Jesus Roque Loureiro - Universidade de Coimbra

Uberlândia, 30 de novembro de 2018



Documento assinado eletronicamente por **Louriel Oliveira Vilarinho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/11/2018, às 17:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Douglas Bezerra de Araujo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/11/2018, às 17:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Celeste Monteiro de Souza Costa, Usuário Externo**, em 30/11/2018, às 17:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Tiago Felipe de Abreu Santos, Usuário Externo**, em 30/11/2018, às 17:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Américo Scotti, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/11/2018, às 17:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS ALBERTO MENDES DA MOTA, Usuário Externo**, em 30/11/2018, às 17:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0879606** e o código CRC **B918AD7A**.