

ADRIANO ALBINO MACHADO

**USO DA TÉCNICA DE OSCILAÇÃO LONGITUDINAL DA TOCHA VISANDO O
INCREMENTO DA PRODUÇÃO NA SOLDAGEM DE UNIÃO EM ÂNGULO ENTRE
CHAPAS DE ESPESSURAS DISSIMILARES**

Florianópolis

2016

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
DEPARTAMENTO ACADEMICO DE METAL MECANICA PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM MECATRÔNICA**

ADRIANO ALBINO MACHADO

**USO DA TÉCNICA DE OSCILAÇÃO LONGITUDINAL DA TOCHA VISANDO O
INCREMENTO DA PRODUÇÃO NA SOLDAGEM DE UNIÃO EM ÂNGULO ENTRE
CHAPAS DE ESPESSURAS DISSIMILARES**

Dissertação submetida ao programa de Pós Graduação em Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Mecatrônica.

Professor orientador: Nelso Gauze Bonacorso.

**Florianópolis-SC
Setembro/2016**

M149u Machado, Adriano Albino

Uso da técnica de oscilação longitudinal da tocha visando o incremento da produção na soldagem de união em ângulo entre chapas de espessuras dissimilares [dissertação] / Adriano Albino Machado ; orientador Nelso Gauze Bonacorso. – Florianópolis, SC, 2016.

61 p.

Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica.

Inclui bibliografia

1. GMAW. 2. Mecanização da soldagem. 3. Solda de união. 4. Procedimento robusto. 5. Switch back. I. Bonacorso, Nelso Gauze. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica. III. Título.

CDD 629.8

Catalogado por: Karla Viviane Garcia Moraes – CRB14/1002 do Instituto Federal de Santa Catarina, Jaraguá do Sul - Rau

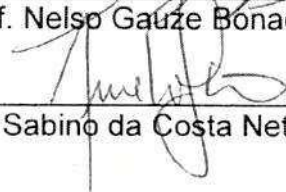
USO DA TÉCNICA DE OSCILAÇÃO LONGITUDINAL DA TOCHA VISANDO O
INCREMENTO DA PRODUÇÃO NA SOLDAGEM DE UNIÃO EM ÂNGULO ENTRE
CHAPAS DE ESPESSURAS DISSIMILARES

ADRIANO ALBINO MACHADO

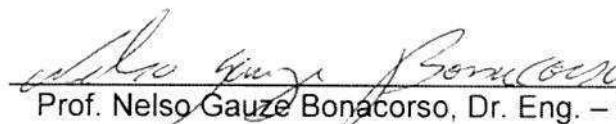
Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em
Mecatrônica e aprovada na sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em
Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa
Catarina.

Florianópolis, 30 de Setembro de 2016


Prof. Nélso Gauze Bonacorso, Dr. Eng. – Orientador


Prof. Aurélio Sabino da Costa Netto, Dr. Eng. – Coordenador do Curso

Banca Examinadora:


Prof. Nélso Gauze Bonacorso, Dr. Eng. – Presidente


Prof. Renon Steinbach Carvalho, Dr. Eng. - Titular


Prof. Mateus Barancelli Schwedersky, Dr. Eng. - Titular

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me iluminado e guiado pelos caminhos certos, possibilitando que eu chegasse até aqui. A meus pais pelo carinho, atenção e educação que me deram. Ao professor e amigo Nelso Gauze Bonacorso pelo tempo dedicado a orientação deste trabalho.

RESUMO

A união em ângulo de componentes estruturais de espessuras dissimilares por procedimentos manuais ou automáticos de soldagem tradicionais podem apresentar falta de penetração, mordeduras e até mesmo perfurações, visto que a correta energia de soldagem a ser empregada está diretamente relacionada à espessura de cada componente. A ocorrência destes defeitos se deve principalmente à falta de robustez do procedimento de soldagem diante das possíveis irregularidades geométricas nas juntas e da própria diferença de espessura entre os componentes estruturais. Além disso, a profundidade das mordeduras e a quantidade de perfurações são ampliadas quando se deseja aumentar a produção com o processo GMAW. Isso se deve ao incremento da potência elétrica do arco para manter constante a quantidade de material depositado na junta, em função do aumento da velocidade de soldagem. Diante do exposto, a presente dissertação realiza o uso da técnica de oscilação longitudinal da tocha de soldagem, conhecida na literatura por *switch back*, para aumentar a produção com qualidade, na soldagem de união em ângulo de 90° entre chapas de espessuras dissimilares. Foram usados procedimentos de soldagem sem oscilação (velocidade da tocha igual à de soldagem) e *switch back* de três passes com velocidade da tocha constante e variável (velocidade de avanço quatro vezes maior que a de retorno). O critério de aprovação dos cordões de solda gerados foi baseado nas normas ISO de soldagem. Os resultados obtidos evidenciaram um aumento não significativo de produção com o uso da técnica *switch back* do tipo velocidade constante da tocha.

Palavras-chaves: GMAW, mecanização da soldagem, solda de união, procedimento robusto, *switch back*.

ABSTRACT

The union angled structural components of dissimilar thicknesses by manual or automated procedures traditional welding can show lack of penetration, bites and even perforations, since the correct welding energy to be employed is directly related to the thickness of each component. The occurrence of these defects is mainly due to lack of robustness of the welding procedure on the possible geometrical irregularities in the joints and very difference in thickness between the structural components. Moreover, the depth of the undercuts and the number of perforations are magnified when one wishes to increase the production with the GMAW process. This is due to the increase of the electric arc power to keep constant the amount of material deposited in the joint, due to the increase of the welding speed. Given the above, the present work done using the longitudinal oscillation of the welding torch technique, known in the literature by switch back to increase production quality, the welding joining angle of 90 ° between plates of dissimilar thicknesses. They were used without oscillating welding procedures (equal to the speed of the torch welding) and switch back three passes with constant velocity and variable torch (forward speed four times greater than the return). The weld beads of approval criteria generated was based on welding ISO standards. The results showed a non-significant increase in production with the use of technical switch back type constant velocity of the torch.

Keywords: GMAW, mechanized welding, union weld, robust procedure, switch back.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo GMAW, em (a) manual e em (b) automático.....	17
Figura 2 - Sensor laser de visão acoplado a tocha GMAW.....	18
Figura 3 - Princípios de funcionamento do sensor elétrico.....	19
Figura 4 - Defeitos de soldagem: (a) falta de fusão, (b) mordedura, (c) perfuração..	20
Figura 5 - Principais componentes de um sistema GMAW automatizado.....	23
Figura 6 - Características geométricas de um cordão de solda.	24
Figura 7 - Características operacionais do processo GMAW.....	24
Figura 8 -Transferência metálica e comportamento temporal da tensão e da corrente elétrica do arco na polaridade CC- com 98%Ar+2%O ₂	27
Figura 9 - Em (a) Perfil e Macrografia com Ar +2%O ₂ , em (b) perfil e macrografia com Ar + 18% CO ₂	27
Figura 10 - Comportamento dos arcos elétricos, GMAW CC+ em (a) e GMAW CC- em (b).....	28
Figura 11 - Na parte superior o cordão soldado com CC- e a sua macrografia e na parte inferior o cordão soldado com CC+ e a sua macrografia	29
Figura 12 - Os diferentes tipos de transferência metálica	30
Figura 13 - Distância bico de contato peça	31
Figura 14 - Ilustração da técnica de oscilação switch back.....	34
Figura 15 - Aspecto visual da soldagem da circunferência interna de uma roda de trator soldada com oscilação longitudinal da tocha	36
Figura 16- Resultado do uso de sincronismo: A – Cordão com polaridade CC-; B – Seção transversal do cordão A; C - Cordão com polaridades CC- e CC+; D – Seção transversal do cordão C; E – Cordão com polaridade CC+; F – Seção transversal do cordão E.....	37
Figura 17 - Resultados da penetração em relação à inclinação da tocha de soldagem. (a) empurrando, (b) perpendicular, (c) puxando.....	40
Figura 18 - Características Geométricas dos Corpos de Prova	41
Figura 19 - (a) Fonte de soldagem ICM. (b) Manipulador de soldagem	43
Figura 20 - Características da morsa desenvolvida, CAD à esquerda e protótipo à direita.	43

Figura 21 - CAD e foto do dispositivo de três graus de liberdade. Em (A) ajuste do ângulo de sentido de soldagem, em (B) ajuste do ângulo de ataque e em (C) ajuste da altura da tocha (eixo z).....	44
Figura 22 - (a) Máquina de eletroerosão a fio Charmilles (b) Estereoscópio Zeiss ...	45
Figura 23 - Dimensões relacionadas pela normas ISO de soldagem com base nas espessuras das chapas.....	47
Figura 24 - Foto do ensaio realizado para determinar a corrente de transição.	48
Figura 25- Solução gráfica da corrente de soldagem em função da velocidade de arame.	50
Figura 26 - Em (a) ângulo de ataque e em (b) ângulo de sentido de soldagem e o afastamento vertical.	51
Figura 27 - Aspectos visuais dos cordões soldados. Em (a) linear tradicional, em (b) <i>switch back</i> com velocidade constante e em (c) <i>switch back</i> com velocidade variável.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Influência da polaridade na taxa de deposição	29
Tabela 2 - Influência da velocidade de soldagem na energia de soldagem, na penetração e no reforço da solda.....	33
Tabela 3 - Características dos cordões de solda.	38
Tabela 4 - Influência dos ângulos de ataque da tocha de soldagem.....	39
Tabela 5 - Composição química do arame ER70S-6 em valores percentuais.	42
Tabela 6 - Valores admissíveis aplicados aos critérios de qualidade da solda entre chapas de espessuras: $t = t_1 = 2,00$ mm e $t_2 = 6,35$ mm.....	47
Tabela 7 - Experimentos realizados com trajetória tradicional	52
Tabela 8 - Resultados obtidos com as trajetórias do tipo switch back velocidade contínua e <i>switch back</i> com velocidade variável.....	54

SIMBOLOGIA

a – Garganta

A – Âmpere

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Ad – Área depositada

Af – Área fundida

API – *American Petroleum Institute*

Ar – Argônio

AWS – *American Welding Society*

b – Folga

CC+ - Polaridade Positiva

CC- - Polaridade Negativa

cm/s – Centímetro por segundo

CMT – *Cold Metal Transfer*

Cu - Cobre

CO₂ – Dióxido de carbono

D – razão cíclica

da – Distância de avanço

dr – Distância de recuo

DBCP – Distância Bico de Contato Peça

DIN - *Deutsches Institut für Normung*

g – Garganta

GMAW – *Gás Metal Arc Welding*

H – Energia de Soldagem

He - Hélio

H_L – Energia líquida de soldagem

I – Corrente

ISO – International Organization for Standardization

J/cm – Joule por centímetro

L – Largura

mm – Milímetro

m/min – Metros por min

Mn – Manganês

O₂ - Oxigênio

P – Potásio

Pe – Penetração

R – Reforço

S – Enxofre

Si – Silício

t – Espessura mínima

T – Período de cada ciclo da trajetória *switch back*

ta – Tempo de avanço

tr – Tempo de recuo

TIG - *Tungsten Inert Gas*

U – Mordedura

vs – Velocidade de soldagem

V – Tensão eficaz de soldagem

va – Velocidade de avanço

vr – velocidade de recuo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	19
1.2	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	20
1.3	OBJETIVOS	21
1.3.1	OBJETIVO GERAL	21
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO GMAW DE UNIÃO	24
2.1.1	VAZÃO E TIPO DO GÁS DE PROTEÇÃO	26
2.1.2	INFLUÊNCIAS DA POLARIDADE DO ARCO ELÉTRICO	28
2.1.3	INTENSIDADES DA CORRENTE E DA TENSÃO DO ARCO ELÉTRICO	29
2.1.4	DISTÂNCIA BICO DE CONTATO PEÇA (DBCP)	31
2.1.5	VELOCIDADE DE SOLDAGEM E DA TOCHA	32
2.2	CARACTERÍSTICAS DA OSCILAÇÃO DO TIPO SWITCH BACK	33
2.3	ÂNGULO DE ATAQUE DA TOCHA	38
3	MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS	41
3.1	MATERIAIS	41
3.2	EQUIPAMENTOS	42
3.3	METODOLOGIA	45
3.3.1	CRITÉRIOS PARA VALIDAÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1	DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO $i=f(v_a)$ PARA A TRANSFERÊNCIA METÁLICA SPRAY	48
4.2	DETERMINAÇÃO DA ORIENTAÇÃO E POSIÇÃO DA TOCHA	50
4.3	EXPERIMENTO COM TRAJETÓRIA LINEAR	51

4.4	EXPERIMENTOS COM TRAJETÓRIA SWITCH BACK.....	53
5	CONCLUSÕES.....	56
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	58

1 INTRODUÇÃO

Antes da década de 1880, a soldagem era feita somente por forjamento. Todos os outros métodos básicos de soldagem (gás, resistência e arco elétrico) foram desenvolvidos antes da primeira guerra mundial. Entretanto, a soldagem e o corte de metais a gás foram dominantes durante o início do século XX. A partir daí o crescimento industrial e as duas guerras mundiais impulsionaram o desenvolvimento da soldagem a arco elétrico (MACHADO, 1996).

Atualmente, os processos de soldagem a arco elétrico (Eletrodo revestido, GMAW e o TIG) são os mais utilizados industrialmente para a união e para o revestimento de metais. Entre estes, o processo GMAW se destaca em relação aos outros por apresentar maiores níveis de taxa de deposição e de velocidade de soldagem, o que implica em maior capacidade de produção. Porém, suas desvantagens referentes à qualidade como defeitos, incremento da quantidade dos respingos e salpicos são notórias quando o seu respectivo procedimento de soldagem for inadequado (MACHADO, 1996; QUITES, 2008).

As duas formas básicas de aplicação do GMAW são: manual, Figura 1a, e automática ou mecanizada como mostra a Figura 1b. A forma automática aumenta consideravelmente o volume produzido e melhora a repetibilidade e a qualidade do produto.

Entretanto, automatizar um processo de soldagem é uma tarefa complexa, visto que é difícil compensar os desvios geométricos de preparação das juntas e suas alterações de posicionamento durante a soldagem. Já na soldagem manual tais correções são feitas pelo soldador. Além disso, o custo inicial para automatizar um procedimento é alto devido à aquisição do equipamento que irá conduzir a tocha, que na maioria das vezes é um robô antropomórfico ou um manipulador cartesiano.

Figura 1 - Processo GMAW, em (a) manual e em (b) automático



FONTE: Em (a) Thefabricator (2016) em (b) Wix (2016)

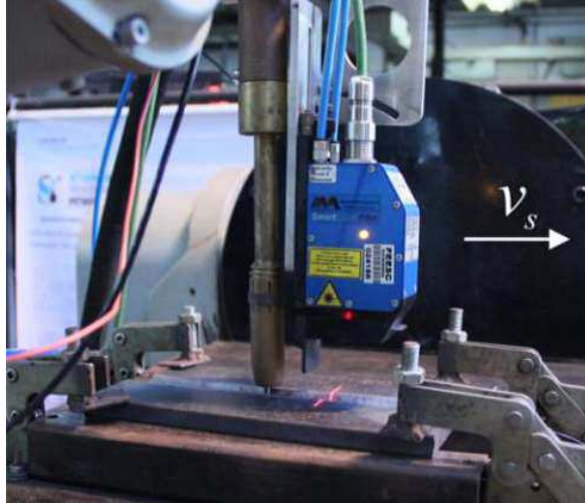
As dificuldades inerentes a automatizar um processo de soldagem são intensificadas nos casos em que os componentes a serem unidos apresentam espessuras diferentes, tendo em vista a complexidade em se determinar os parâmetros de soldagem e de oscilação da tocha que possam garantir a qualidade na solda.

No GMAW é utilizado, em alguns casos, periféricos que possibilitam aumentar a robustez do processo, propiciando o controle de posicionamento da tocha em relação as irregularidades das juntas como exemplos podem ser citados a utilização do sensor laser de visão acoplado a tocha ou a utilização do próprio arco elétrico para realizar esta correção.

O uso de sensor laser de visão acoplado a tocha de solda, Figura 2, é uma maneira de suplantar os problemas supracitados das juntas. Desta forma, a tocha segue automaticamente a junta para compensar seus desvios de posicionamento. Há também um caso menos comum e que está em fase de desenvolvimento no país que o sistema de soldagem adaptativo com laser, onde neste caso o uso do laser possibilita a alteração dos parâmetros de soldagem para compensar a abertura (gap) não uniforme da junta.

Essa modalidade é conhecida como automação da soldagem e o seu custo de implementação é muito maior que a automática, por envolver ainda a compra do oneroso sensor laser de visão (KINDERMANN, 2016).

Figura 2 - Sensor laser de visão acoplado a tocha GMAW

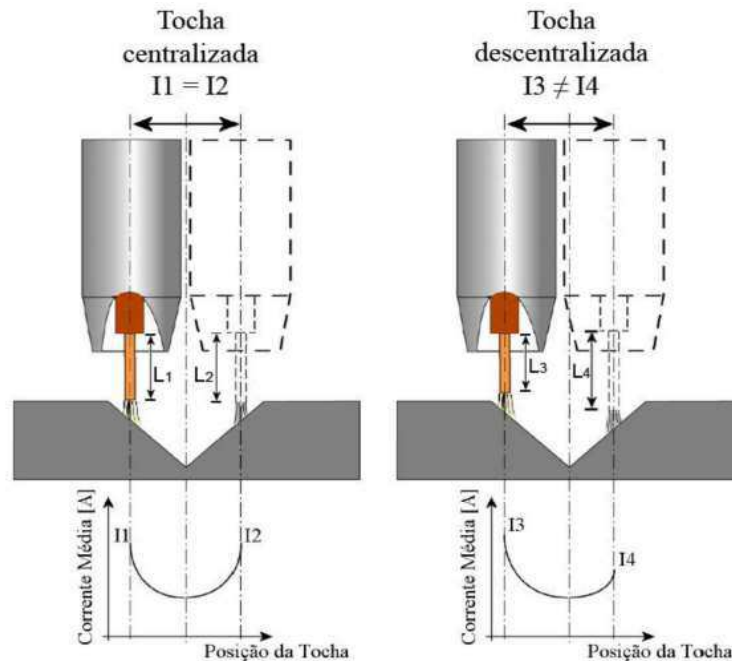


FONTE: Kindermann (2016)

Uma outra maneira de se monitorar e corrigir o movimento da tocha em relação a junta é através da utilização do arco elétrico como sensor, Figura 3. Em alguns processos de soldagem o comprimento do arco é uma das variáveis de maior importância, visto que está diretamente relacionado ao consumo de material de adição e além disto tem influência direta na incidência de mordeduras na solda.

No GMAW a análise do comportamento da corrente pode ser utilizada para determinar que durante a movimentação da tocha houve variação de distância entre o bico de contato e a peça. Mas para que este monitoramento seja possível é necessário que a junta possua um chanfro e que além disto a tocha oscile transversalmente, em razão, da necessidade de se variar a distância entre a tocha e a junta e em consequência variar a intensidade da corrente (VIVIANI, 2015). A Figura 3 mostra que a intensidade da corrente de soldagem diminui quando aumenta a distância entre a tocha e a junta e vice versa.

Figura 3 - Princípios de funcionamento do sensor elétrico



FONTE: Mendonça (2013)

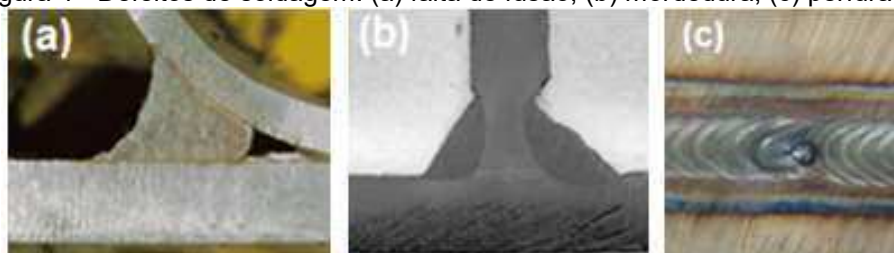
1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Componentes estruturais unidos por GMAW, devem ter resistência mecânica adequada para suportar os esforços de trabalho, sem que haja rompimento das uniões de solda. A qualidade das referidas uniões está diretamente relacionada com a energia de soldagem usada, que por sua vez, é diretamente proporcional à espessura dos componentes estruturais que formam a junta.

Nos casos em que os componentes estruturais têm a mesma espessura a energia de soldagem a ser aplicada e os outros parâmetros do procedimento, podem ser determinados com base em informações contidas em documentação técnica. Porém, em muitos casos práticos os componentes estruturais possuem espessuras diferenciadas. Neste tipo de situação, os parâmetros do procedimento de soldagem a serem empregados são mais difíceis de serem determinados com base em informações contidas na literatura, sendo geralmente encontrados de forma experimental.

A Figura 4 mostra três situações de reprovação de uniões soldadas por procedimentos inadequados. Na Figura 4a ocorre o defeito de falta de fusão por uso de uma baixa energia de soldagem, enquanto que na Figura 4b a alta energia de soldagem produziu uma acentuada mordedura no lado direito da chapa fina. Em alguns casos extremos ocorre falta de continuidade, Figura 4c, devido ao excesso de velocidade de soldagem que atrasa o deslocamento da poça de fusão em relação ao arco elétrico. Esse tipo de defeito na literatura é conhecido com *humping* (NGUYEN *et al.*, 2006).

Figura 4 - Defeitos de soldagem: (a) falta de fusão, (b) mordedura, (c) perfuração



FONTE: Em (a) Primária (2016) em (b) SEAS (2016) em (c) Weizenmann (2015)

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Situações em que componentes com espessuras dissimilares são unidos pelo processo GMAW são comumente encontradas na fabricação naval, na indústria de máquinas agrícolas, caldeirarias e em diversas outras empresas do setor metalúrgico. Em alguns casos, as uniões são realizadas de forma manual, onde o soldador controla melhor a poça de fusão e, assim, reduz à ocorrência dos defeitos de soldagem. Em outros casos, a forma automática é usada com corrente e velocidade de soldagem reduzida para garantir a qualidade. Em ambas as situações a produção é menor, resultando no encarecimento dos produtos fabricados, na diminuição dos lucros e na perda de competitividade.

Neste sentido, soluções de baixo custo devem ser exploradas para aumentar a produção, sem o prejuízo da qualidade na soldagem de componentes estruturais com espessuras dissimilares. A técnica de oscilação longitudinal da tocha, conhecida por *switch back*, é uma solução geralmente aplicada em duas situações. A primeira é para

aumentar a robustez do procedimento de soldagem frente a irregularidades geométricas das juntas. Soldadores usam esta técnica com o objetivo de alongar a poça de fusão e, com isso, minimizar mordeduras e perfurações (BONACORSO *et al.*, 2011). A segunda situação é para incrementar a produção na soldagem automática (ALMEIDA, MOTA e SCOTTI, 2011). A soldagem manual é raramente usada com este propósito, devido às limitações do soldador em termos de repetibilidade do movimento de oscilação e da maior velocidade de condução da tocha.

O uso da técnica switch back, em comparação com a soldagem sem oscilação da tocha, proporciona, segundo trabalhos publicados, um aumento significativo da produção da soldagem de união em juntas de sobrepor (ALMEIDA, MOTA e SCOTTI, 2011) e de topo (KANEKO, YAMANE e OSHIMA, 2009) com chapas de mesma espessura. Nesta direção, a relevância desse trabalho está em investigar a possibilidade de similar incremento na produção da soldagem de união em ângulo entre chapas de espessuras dissimilares.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Baseado na relevância do tema, o objetivo geral desse trabalho de dissertação é o de estudar o uso da técnica de oscilação longitudinal da tocha no processo GMAW para incrementar a produção com qualidade na soldagem de união em ângulo entre chapas de espessuras dissimilares.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Projetar e construir uma mesa de posicionamento e fixação para a soldagem dos corpos de provas;

- Desenvolver um mecanismo de posicionamento e orientação da tocha GMAW para definir experimentalmente a posição da tocha em relação a junta e os dois ângulos: sentido de soldagem e de ataque;

- Verificar experimentalmente qual tipo de técnica *switch back* de três passes proporciona maior incremento de produção;

- Avaliar a qualidade dos cordões de solda gerados com base em critérios de aprovação.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para alcançar os objetivos propostos, o presente trabalho está estruturado em cinco capítulos sendo o primeiro capítulo, a própria introdução do tema.

No segundo capítulo, encontra-se uma fundamentação teórica sobre o processo GMAW, contemplando suas principais características, vantagens, desvantagens e a sua automatização. Nesse capítulo é também abordada a técnica *switch back* para o aumento da produção e da robustez do procedimento de soldagem.

No terceiro capítulo, são descritas as características dos corpos de prova, os periféricos utilizados, a metodologia de soldagem empregada e os critérios de aprovação usados para a solda de união.

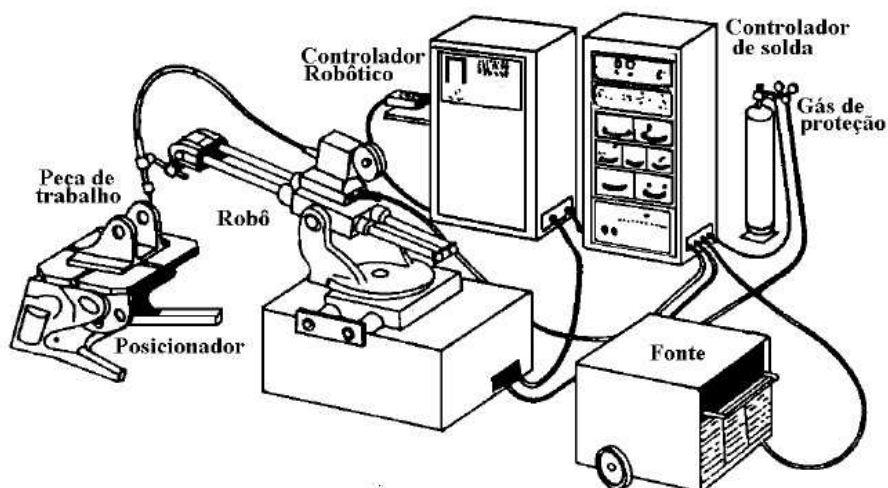
No quarto capítulo, são apresentados os resultados obtidos e a respectiva discussão.

Por fim, no quinto capítulo, encontram-se a conclusão desta pesquisa e sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros derivados deste.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A versatilidade, a facilidade de operação, o baixo custo, a alta produção e a qualidade das soldas fazem do processo GMAW a escolha natural das indústrias quando há necessidade de automatizar, Figura 5, operações manuais de soldagem. Variantes do GMAW tais como: polaridade negativa, corrente pulsada e alternada, duplo arame, CMT, entre outros, tem a aplicabilidade em casos específicos, evidenciando a ampla gama de utilização deste processo (HUBERT, 2014).

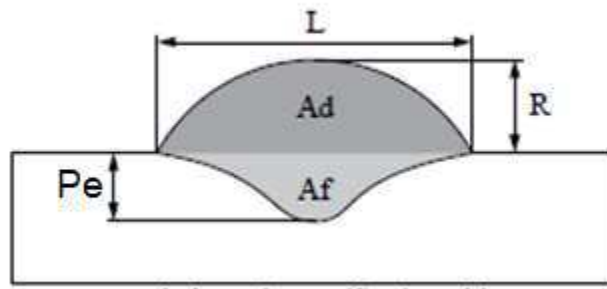
Figura 5 - Principais componentes de um sistema GMAW automatizado



FONTE: Soldagem automática (2016)

As características geométricas (L: largura, R: reforço, Pe: penetração, Ad: área depositada e Af: área fundida) dos cordões de solda, conforme mostra a Figura 6, são dependentes dos parâmetros do procedimento de soldagem. Em outras palavras, as características supracitadas são influenciadas, tanto pelos parâmetros do processo GMAW (como a tensão, a corrente elétrica, a velocidade de soldagem, o tipo de gás de proteção, o ângulo de ataque, etc.), quanto pelos parâmetros da oscilação do arco elétrico, como: a amplitude, a frequência e a direção.

Figura 6 - Características geométricas de um cordão de solda.

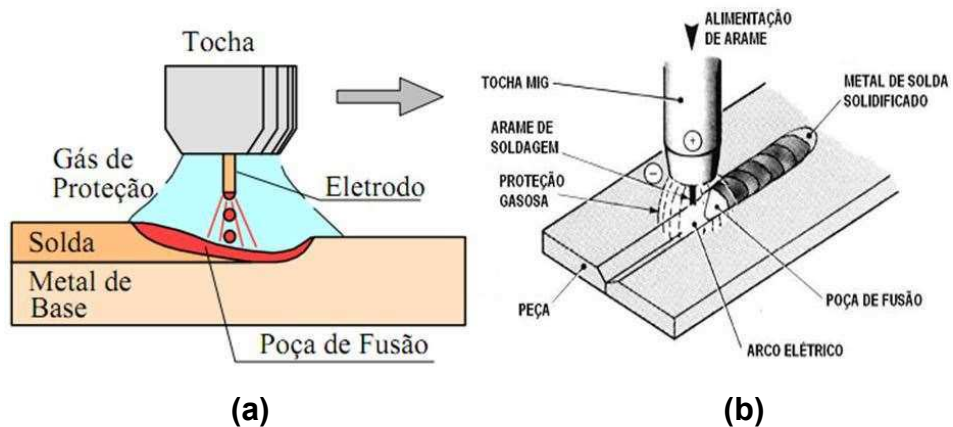


FONTE: adaptado de Pessoa *et al.* (2010)

2.1 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO GMAW DE UNIÃO

O calor produzido pelo arco elétrico protegido pelo gás no procedimento GMAW é utilizado para unir duas ou mais peças metálicas, assegurando, na junta soldada, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas (PONOMAREV e SCOTTI, 2008). Este arco elétrico, conforme mostra a Figura 7, é estabelecido pela circulação da corrente elétrica entre o eletrodo consumível, alimentado de forma contínua, e à poça de fusão.

Figura 7 - Características operacionais do processo GMAW



FONTE: Em (a) Balmer (2015) em (b) Fortes (2005)

A energia de soldagem H é a energia fornecida pela fonte de calor, arco elétrico no caso do processo GMAW, por unidade de comprimento da solda. Sua unidade é o Joule por centímetro (J/cm). Essa grandeza é utilizada para avaliar os efeitos

metalúrgicos na soldagem sobre o material soldado e na comparação de diferentes procedimentos e processos de soldagem.

Neste último caso, a grandeza mais adequada é a energia líquida de soldagem H_L (em J/cm), também chamada de calor imposto (*heat input*). Para a obtenção dos valores das referidas energias de soldagens são usadas as equações (1) e (2), onde: V é a tensão eficaz de soldagem, em Volts; I é a corrente eficaz de soldagem, em Amperes; v é a velocidade de soldagem, em cm/s e η é um fator adimensional de rendimento (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

$$H = \frac{1}{v \cdot T} \int_0^T V \cdot I \, dt \cong \frac{V \cdot I}{v} \quad (1)$$

$$H_L = \eta \cdot H \quad (2)$$

Por sua vez, o rendimento depende do tipo de processo (Eletrodo revestido, GMAW, TIG, etc.), dos parâmetros de soldagem (vazão de gás, tensão e corrente de soldagem e a distância bico de contato peça (DBCP)) e de diversos outros aspectos, como a geometria da peça e as propriedades físicas dos materiais (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

Geralmente, o uso da aproximação indicada na equação (1) é suficiente. Um erro cometido com frequência é considerar nesta equação simplificada o produto das médias de tensão e de corrente no lugar da média do produto dessas grandezas.

A regulagem dos parâmetros do processo GMAW influencia diretamente na geometria do cordão soldado. O tamanho e o formato do cordão de solda devem ser considerados, tanto em projetos, quanto na manufatura de peças metálicas por repercutir diretamente no custo de fabricação.

Os parâmetros mais relevantes neste processo são: tipo de gás de proteção, polaridade, tipo e intensidade de corrente, tensão elétrica, DBCP e a velocidade de soldagem (IBRAHIM *et al.*, 2012).

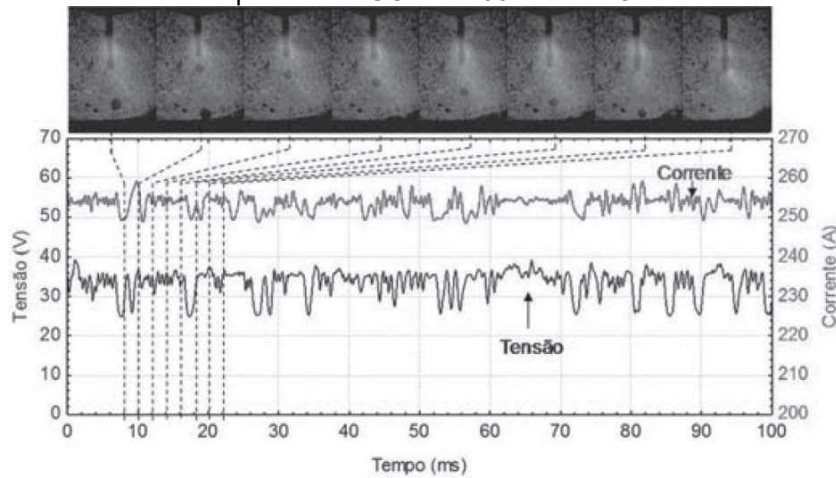
2.1.1 VAZÃO E TIPO DO GÁS DE PROTEÇÃO

A vazão do gás de proteção da poça de fusão a ser empregada no processo GMAW é diretamente proporcional à intensidade de corrente elétrica utilizada e também do tipo de junta utilizada (MOREIRA, 2008). Os gases de proteção utilizados no GMAW são o argônio (Ar), o hélio (He), o dióxido de carbono (CO₂), o oxigênio (O₂) ou uma mistura destes (FORTES, 2004 apud MOREIRA, 2008).

O gás de proteção não exerce apenas a função principal de proteger a região da solda. Além disto, exerce efeitos adicionais como: estabilizar o arco, controlar a operacionalidade e a transferência metálica, influenciar na geometria do cordão e pode alterar as propriedades mecânicas e as características metalúrgicas da solda (PONOMAREV e SCOTTI, 2008).

Em uma revisão sobre transferência metálica, SCOTTI (1998) apud SOUZA, de RESENDE e SCOTTI (2009); relatam que o tipo de gás de proteção utilizado pode propiciar a formação de gotas repelidas mesmo na polaridade CC+. Com a mistura de proteção, 98%Ar+2%O₂, é possível obter transferência sem gotas repulsivas, Figura 8, ao contrário do que é informado na literatura corrente sobre a polaridade CC-.

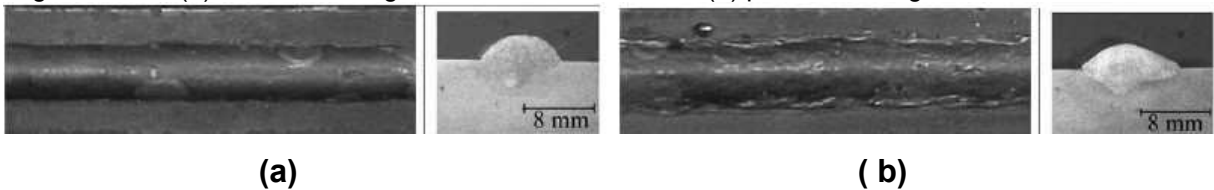
Figura 8 -Transferência metálica e comportamento temporal da tensão e da corrente elétrica do arco na polaridade CC- com 98%Ar+2%O₂



FONTE: Souza, Resende e Scotti (2009)

Souza, Resende e Scotti (2009) avaliaram a influência das misturas de gás de proteção sobre a geometria de cordões de solda, mantendo-se constantes os parâmetros: corrente de soldagem (250 A), vazão do gás de proteção (13 l/min), DBCP (20 mm). O material de deposição utilizado foi o arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro sobre uma chapa plana de aço ABNT 1020 nas dimensões de 200 x 25,4 x 9,5 mm em modo corrente constante CC +. Observaram que somente com a mudança da mistura de proteção para 82%Ar+18%CO₂, foram obtidos cordões de solda mais largos, menos convexos e com piores aspectos, Figura 9b. Além disto, houve uma redução na taxa de fusão do arame eletrodo em relação à soldagem utilizando-se a mistura 98%Ar+2%O₂, Figura 9a.

Figura 9 - Em (a) Perfil e Macrografia com Ar +2%O₂, em (b) perfil e macrografia com Ar + 18% CO₂



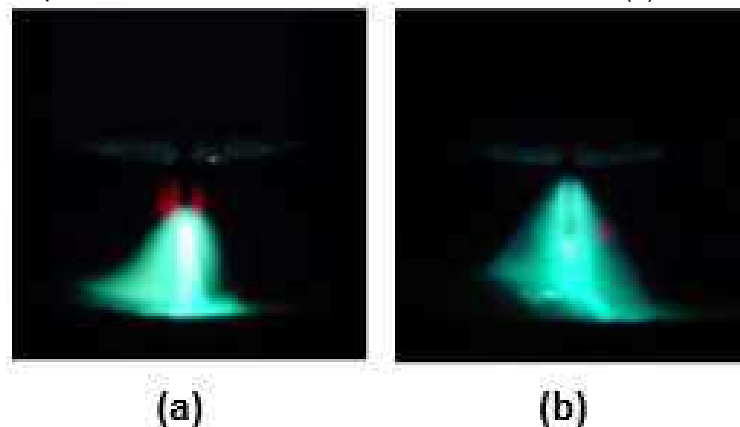
FONTE: Souza, Resende e Scotti (2009)

2.1.2 INFLUÊNCIAS DA POLARIDADE DO ARCO ELÉTRICO

Na maior parte das aplicações do GMAW é utilizado a corrente contínua com polaridade CC+, ou seja, o polo positivo no eletrodo, Figura 10(a). O uso desta polaridade positiva é justificado em razão da maior estabilidade do arco, da menor geração de respingos e da formação de uma geometria mais adequada do que a polaridade negativa.

Em contra partida o GMAW com polaridade CC-, Figura 10(b), proporciona uma maior taxa de fusão do eletrodo, necessitando de menor intensidade de corrente para a mesma deposição de material (SOUZA, RESENDE e SCOTTI, 2009). Esta taxa de fusão diferenciada do eletrodo pode ser explicada pelo comportamento do arco elétrico. No GMAW CC- o arco elétrico não se ancora só na extremidade do eletrodo como no GMAW CC+, e sim abraça o eletrodo amplamente, buscando pontos onde a emissão de elétrons seja favorecida pela presença de óxidos. Esta característica faz com que uma maior parcela da energia do arco se transfira para o eletrodo, aumentando a sua fusão relativa, em detrimento da fusão da peça.

Figura 10 - Comportamento dos arcos elétricos, GMAW CC+ em (a) e GMAW CC- em (b)



FONTE: Dutra *et al.* (2013)

Lenivkin *et al.* (1989) apud Scotti e Ponomarev (2008) comprovaram a diferenciada taxa de fusão do eletrodo por meio de ensaios de soldagem descritos na tabela 1.

Tabela 1 - Influência da polaridade na taxa de deposição

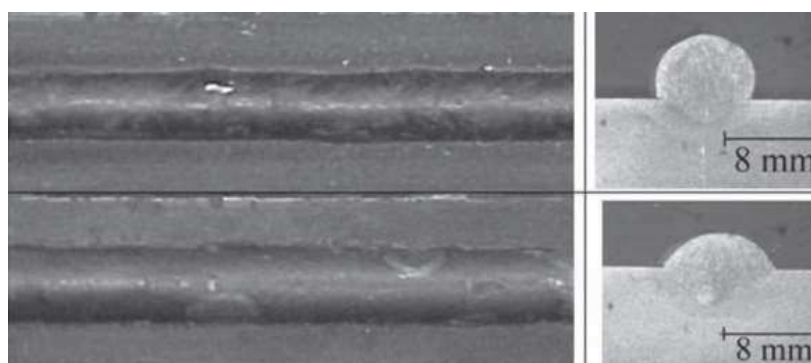
Ensaio	Polaridade	Corrente (A)	Velocidade do arame (m/min)
1	CC+	340	3,0
2	CC-	215	3,0
3	CC-	340	5,1

FONTE: adaptado de Ponomarev e Scotti (2008)

Souza, de Resende e Scotti (2009) realizaram experimentos com o objetivo de verificar as influências do gás de proteção, da intensidade da corrente e da polaridade sobre a transferência metálica no GMAW.

Foi observado, como mostra a Figura 11, uma considerável diferença de geometria dos cordões de solda entre os experimentos com polaridades CC- e CC+. Foi utilizado nos referidos experimentos o mesmo gás de proteção (98%Ar+2%O₂), a mesma velocidade de soldagem (0,348 m/min) e a mesma intensidade de corrente elétrica (250 A) com uma velocidade de alimentação de arame de 11,7 m/min em CC- e 7,2 m/min em CC+. A área fundida teve uma grande variação, de 7,2 mm² na polaridade CC- para 16,8 mm² na polaridade CC+.

Figura 11 - Na parte superior o cordão soldado com CC- e a sua macrografia e na parte inferior o cordão soldado com CC+ e a sua macrografia



FONTE: Souza, Resende e Scotti (2009)

2.1.3 INTENSIDADES DA CORRENTE E DA TENSÃO DO ARCO ELÉTRICO

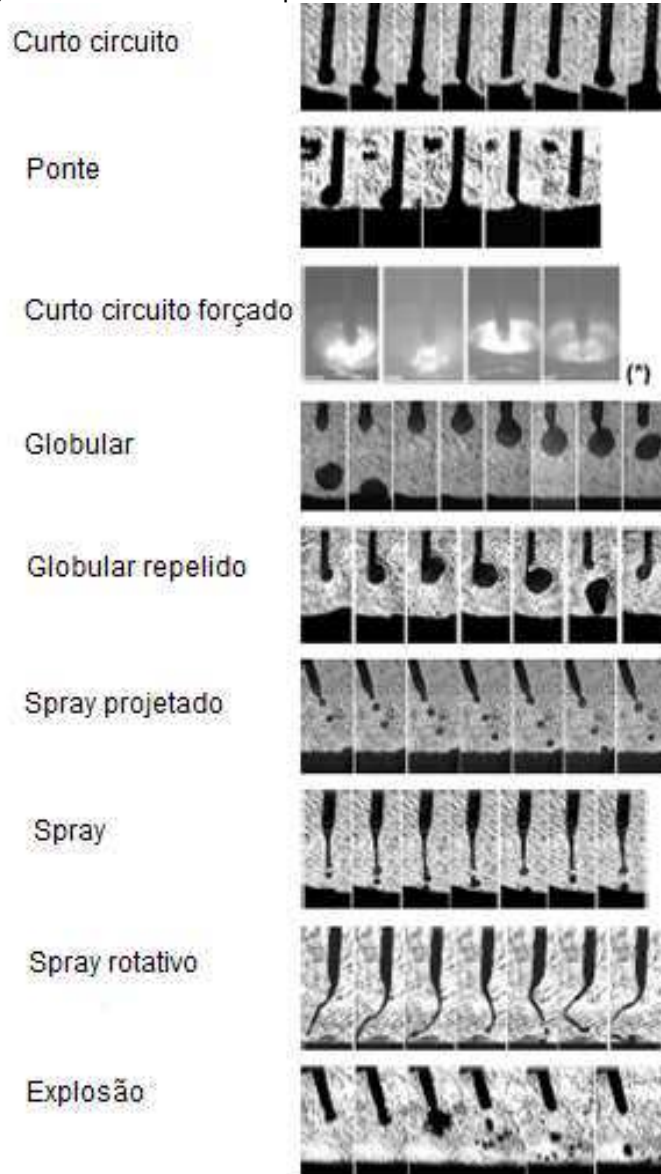
A tensão e a corrente são responsáveis pela maior parte das características desejáveis no processo de soldagem a arco elétrico (PONOMAREV e SCOTTI, 2008).

Correntes demasiadamente altas podem resultar na perda de resistência mecânica da peça, em razão de propiciar a perfuração da junta (INFOSOLDA, 1997).

A corrente é o parâmetro com maior influência no consumo, no modo de transferência, na penetração e no reforço da solda (MACHADO, 1996). A intensidade da corrente e da tensão do arco definem o modo de transferência metálica do processo GMAW. Com o aumento de ambos, tensão e corrente do arco elétrico, vai-se do modo de transferência por curto-circuito ao spray.

Figura 12 mostra os modos de transferência metálicas que ocorrem no GMAW.

Figura 12 - Os diferentes tipos de transferência metálica



FONTE: adaptado de Ponomarev e Scotti (2008)

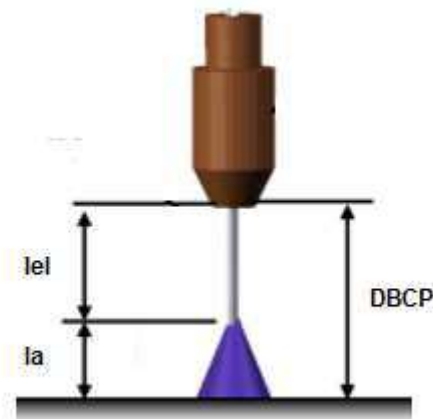
Sempre que possível aconselha-se a utilização da transferência por spray, em razão de permitir altas taxas de deposição. Este modo de transferência é caracterizado pela transferência de pequenas gotas uniformes, com diâmetro próximo ao do eletrodo, de forma sequencial e em maior frequência (INFOSOLDA, 1997).

Uma condição indispensável para que ocorra o modo de transferência spray é que a corrente de soldagem ultrapasse o valor da corrente de transição (PONOMAREV e SCOTTI, 2008).

2.1.4 DISTÂNCIA BICO DE CONTATO PEÇA (DBCP)

Como relatado anteriormente a corrente elétrica de soldagem tem grande relevância na definição do modo de transferência e na velocidade de alimentação do arame. Por sua vez, a intensidade desta grandeza depende da DBCP que é o resultado, conforme mostra a Figura 14, da adição do comprimento do arco (l_a) com o comprimento energizado do eletrodo (l_{el}) (PONOMAREV e SCOTTI, 2008).

Figura 13 - Distância bico de contato peça



FONTE: adaptado Morganti (2013)

Quando se aumenta a DBCP com a fonte de soldagem operando em modo tensão constante, aumenta-se também a resistência elétrica do eletrodo,

incrementando com isso, o seu aquecimento por efeito Joule. Em função dessa elevação de temperatura do eletrodo, consegue-se fundir uma maior quantidade de arame com a mesma intensidade da corrente de soldagem (GIMENES, 2005 apud DOBGINIES, 2008).

Para se ter uma noção dessa redução de corrente elétrica, Souza e Scotti (2009) verificaram uma redução de 172 A para 150 A quando incrementaram de 12 mm para 16 mm a DBCP em uma atmosfera gasosa de 92%Ar+8%CO₂ com velocidade de alimentação do arame eletrodo de 3,5 m/min.

2.1.5 VELOCIDADE DE SOLDAGEM E DA TOCHA

Velocidade de soldagem é definida como a razão entre o comprimento da junta a ser soldada e o tempo necessário de execução do respectivo cordão de solda. Assim como a corrente de soldagem, esse parâmetro possui grande influência sobre a geometria do cordão de solda. Grandes velocidades de soldagem resultam em um cordão estreito e convexo com bordas irregulares e baixa penetração. Velocidades muito pequenas de soldagem resultam em um cordão largo e alto com maior molhabilidade e área fundida (MACHADO, 1996).

A velocidade da tocha é igual à velocidade de soldagem somente na soldagem do tipo filetada, trajetória linear. Nas trajetórias de soldagem que envolve oscilação transversal e ou longitudinal da tocha (tipo *switch back*, triangular, duplo oito, etc.) a velocidade da tocha é sempre superior à velocidade de soldagem.

Pereira, Buschinelli e Kejelin (2013) avaliaram a influência da velocidade de soldagem no GMAW para a recuperação de dutos de alta resistência e baixa espessura por meio de experimentos. Nestes foram realizadas soldas em dutos com espessura de 3,0 mm e 3,2 mm de aço API 5L X70, utilizando-se como material de adição o arame AWS ER80S-G. Nos experimentos realizados, com corrente constante de 75 A, pode ser observado que velocidades menores de soldagem resultam em maior energia de soldagem, aumento do reforço e da penetração, Tabela 2.

Cabe ressaltar, que no referido experimento a quantidade de material depositado na junta foi maior na condição de velocidade de soldagem de 18 cm/min do que 25 cm/min.

Tabela 2 - Influência da velocidade de soldagem na energia de soldagem, na penetração e no reforço da solda

Vel. de soldagem (cm/min)	Energia de soldagem (KJ/cm)	Penetração (mm)	Reforço (mm)	Largura (mm)
25,00	4,27	1,02	1,98	6,21
18,00	6,12	1,47	2,60	8,27

FONTE: adaptado de Pereira, Buschinelli e Kejelin (2013)

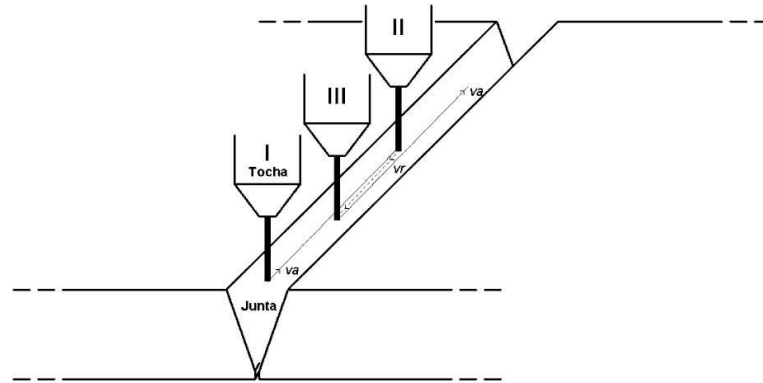
Nas situações onde se deseja incrementar a produção pelo aumento da velocidade de soldagem, mas mantendo constante a quantidade de material depositado na junta, a penetração tem comportamento oposto ao supracitado, ou seja, crescente com o aumento da velocidade de soldagem. Segundo Resende *et al.* (2009) este aumento da penetração com maior velocidade de soldagem é explicado pelo fato de que com o aumento a corrente há também um aumento da pressão exercida pelo arco sobre a poça fundida em função da maior concentração de campos magnéticos. Outra justificativa apontada por Scotti e Rodrigues (2008) apud Resende *et al.* (2009) é que o aumento da corrente resulta em gotas com maior velocidade e isto também auxilia para o aumento da penetração.

2.2 CARACTERÍSTICAS DA OSCILAÇÃO DO TIPO SWITCH BACK

Na técnica *switch back*, conforme mostra a Figura 15, há a oscilação da tocha de soldagem na direção longitudinal ao cordão. Inicialmente a tocha avança, da posição I para a II, sobre a junta há uma distância igual à da com velocidade va e, na sequência recua, da posição II para a III, uma distância igual a dr com velocidade vr . Mais ciclos deste movimento com $da > dr$ são usados para cobrir toda a extensão da junta. O período de cada ciclo T é constituído pela soma de duas parcelas, o tempo de avanço ta e o tempo de retorno da tocha tr , conforme a equação (3):

$$T = ta + tr \quad (3)$$

Figura 14 - Ilustração da técnica de oscilação switch back



FONTE: adaptado Yamane et al (2010)

O fator adimensional D conhecido por razão cíclica é definido, equação (4), pela razão entre o tempo de avanço ta e o período T :

$$D = \frac{ta}{T}, \text{ com: } 0 < D < 1 \quad (4)$$

No caso da oscilação *switch back* de três passes a distância de avanço é o dobro da distância de retorno ($da=2.dr=2.d$) e a velocidade de soldagem vs é definida pela equação (5):

$$vs = \frac{d}{T} \quad (5)$$

Assim, as velocidades de avanço va e de retorno vr da tocha podem ser expressas em função da velocidade de soldagem vs e da razão cíclica D pelas equações (6) e (7) respectivamente:

$$va = \frac{da}{ta} = \frac{2.d}{D.T} = \frac{2.vs}{D} \quad (6)$$

$$vr = \frac{dr}{tr} = \frac{d}{T-ta} = \frac{d}{T-D.T} = \frac{d}{T(1-D)} = \frac{vs}{1-D} \quad (7)$$

Com base nas equações (6) e (7) pode-se determinar os percentuais do período T que será usado para o avanço e para o recuo em cada estratégia aplicada na oscilação *switch back*. No caso em que se deseja velocidade da tocha constante, velocidade de avanço igual à de retorno ($v_a = v_r$), basta igualar a equação (6) a (7):

$$v_a = v_r \rightarrow \frac{2 \cdot v_s}{D} = \frac{v_s}{1 - D} \rightarrow 2 - 2 \cdot D = D \rightarrow D = 2/3 \quad (8)$$

Nesse caso, o tempo de avanço t_a corresponde a 2/3 do período T , enquanto que o tempo de retorno t_r corresponde a 1/3 do período T . Substituindo o resultado obtido em (8) na equação (6), obtém-se a seguinte expressão entre as velocidades:

$$v_a = v_r = 3 \cdot v_s \quad (9)$$

Para os casos onde se deseja velocidades de avanço e de retorno diferenciadas segue-se o mesmo raciocínio supracitado. Uma situação investigada nesse trabalho foi o uso de velocidade de avanço igual a quatro vezes a de retorno: $v_a = 4 \cdot v_r$. Nesta situação, ocorre uma inversão dos tempos em relação ao caso anterior ($t_a = 1/3$ do T e $t_r = 2/3$ do T) e as relações de velocidades resultam em: $v_a = 6 \cdot v_s$ e $v_r = 1,5 \cdot v_s$.

Trabalhos acadêmicos realizados constataram que as utilizações da oscilação longitudinal da tocha de soldagem reduzem consideravelmente a penetração das soldas em materiais de diferentes espessuras e com ausência de perfurações. Dutra *et al.* (2014) aplicou a técnica de soldagem GMAW com oscilação longitudinal na soldagem de chapas de diferentes espessuras, a mais espessa de 1/4" e mais delgada com 3/32", para a produção de rodas de tratores agrícolas. Os resultados obtidos constataram que utilização da oscilação longitudinal durante a soldagem aliada aos parâmetros corretos resultou em soldas isentas de defeitos de soldagem tais como: porosidades, trincas, mordeduras e falta de fusão. As Figuras 16a e 16b mostram o aspecto visual da soldagem da circunferência e macrografia respectivamente.

Figura 15 - Aspecto visual da soldagem da circunferência interna de uma roda de trator soldada com oscilação longitudinal da tocha



FONTE : Bonacorso et al (2011)

Pesquisas desenvolvidas com esta técnica no Laprosolda (Centro para Pesquisa e Desenvolvimentos de Processos de Soldagem da Universidade Federal de Uberlândia) demonstraram que com o uso desta técnica é possível aumentar em até 60% a velocidade de soldagem (ALMEIDA, MOTA e SCOTTI, 2011). Outros trabalhos acadêmicos comprovam também a eficiência da técnica de soldagem *switch back* de forma a garantir bom aspecto visual da solda, boa penetração e com ausência de perfurações.

Kaneko; Yamane e Oshima (2009) realizaram soldas na união de chapas de aço de 3,2 mm de espessura posicionadas em topo. Verificaram que o uso da técnica permitiu o controle da raiz da solda em relação à soldagem GMAW convencional. Este controle cresceu quando se utilizou maior nível de velocidade de soldagem durante o avanço da tocha em relação à reversão. Afirmaram que a utilização de oscilação longitudinal durante a soldagem proporciona uma solda de boa penetração sem perfurações. Isto em razão da tocha passar três vezes sobre a mesma região proporcionando o alongamento da poça de fusão. A técnica *switch back* também possibilita que se altere a polaridade do eletrodo em cada passe.

Pires (2014) realizou ensaios preliminares de soldagem na posição plana com o objetivo de analisar as características geométricas dos cordões de solda quando há sincronia entre os parâmetros GMAW da fonte de soldagem e a trajetória com oscilação *switch back*. Como material de base foram utilizadas chapas de aço com dimensões de 200 x 100 x 6,35 mm. O material de adição foi o arame sólido de aço inox 309LSI de 1 mm de diâmetro. O gás de proteção utilizado foi à mistura de 98% Ar+2%O₂ com vazão de 18 l/min. O ângulo de ataque usado foi de 0°, tocha perpendicular à superfície da chapa, com uma DBCP de 20 mm. A fonte operou em

modo corrente sempre com 15 m/min de velocidade de alimentação de arame. Foram elaborados dois programas com distintas correntes elétricas de soldagem. O primeiro usou uma corrente com polaridade CC+ de 250 A, enquanto que o segundo usou uma corrente com polaridade CC- de - 230 A.

Neste ensaio, os três cordões de solda da Figura 17 foram produzidos com os seguintes parâmetros da trajetória *switch back*: velocidade de soldagem de 7 mm/s, avanço de 8 mm da tocha com velocidade de 28 mm/s, recuo de 4 mm da tocha com velocidade de 14 mm/s, DBCP de 20 mm e ângulo de ataque de 0°. Assim, a tocha passa três vezes sobre cada segmento de 4 mm desta trajetória.

Figura 16- Resultado do uso de sincronismo: A – Cordão com polaridade CC-; B – Seção transversal do cordão A; C - Cordão com polaridades CC- e CC+; D – Seção transversal do cordão C; E – Cordão com polaridade CC+; F – Seção transversal do cordão E



FONTE: Pires (2014)

No primeiro e terceiro passes a tocha de soldagem está avançando enquanto que no segundo está recuando. No primeiro ensaio foi usado somente corrente de soldagem CC- com o valor de - 230 A nos três passes. O resultado obtido (Figuras 17A e 17B) mostra um cordão de solda estreito com muito reforço e baixa penetração. O oposto ocorre quando é aplicado corrente de soldagem CC+ (Figuras 17E e 17F). Neste caso, o arco elétrico funde mais o material de base e espalha a poça de fusão, produzindo um cordão de solda largo com reforço reduzido e maior penetração. As Figuras 17C e 17D mostram o resultado obtido quando é usada a polaridade CC- no primeiro e segundo passes e polaridade CC+ no terceiro passe da oscilação *switch back*. Observa-se que o cordão de solda obtido neste ensaio possui características geométricas intermediárias aos cordões de solda das Figuras 17A e 17E, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Características dos cordões de solda.

Grandezas	CC-	CC- e CC+	CC+
Largura (mm)	9.1	11.2	13.5
Reforço (mm)	4.7	3.9	3.3
Penetração (mm)	1.5	2.2	2.9
Área Fundida (mm ²)	4.4	9.6	17.4
Área Depositada (mm ²)	32.1	30.9	29.7
Diluição (%)	12.1	23.7	36.9




FONTE: Pires (2014)

Observa-se que com a inclusão de apenas um passe do ciclo com CC+ consegue-se aumentar consideravelmente os valores de penetração e de diluição.

2.3 ÂNGULO DE ATAQUE DA TOCHA

A inclinação da tocha de soldagem contra ou a favor ao sentido da soldagem têm influência na geometria do cordão. Se o eletrodo for inclinado contra o sentido da soldagem, o jato de plasma empurra o metal líquido para trás fazendo com que o arco incida de maneira mais direta no material de base. Desta forma, há um aumento na penetração e no reforço do cordão. Em contrapartida há diminuição na largura do cordão e a superfície da solda será mais ondulada. Quando o eletrodo está inclinado a favor do sentido da soldagem, o jato de plasma espalha o material líquido, resultando num cordão de menor penetração e de maior largura (QUITES, 2008), Tabela 4.

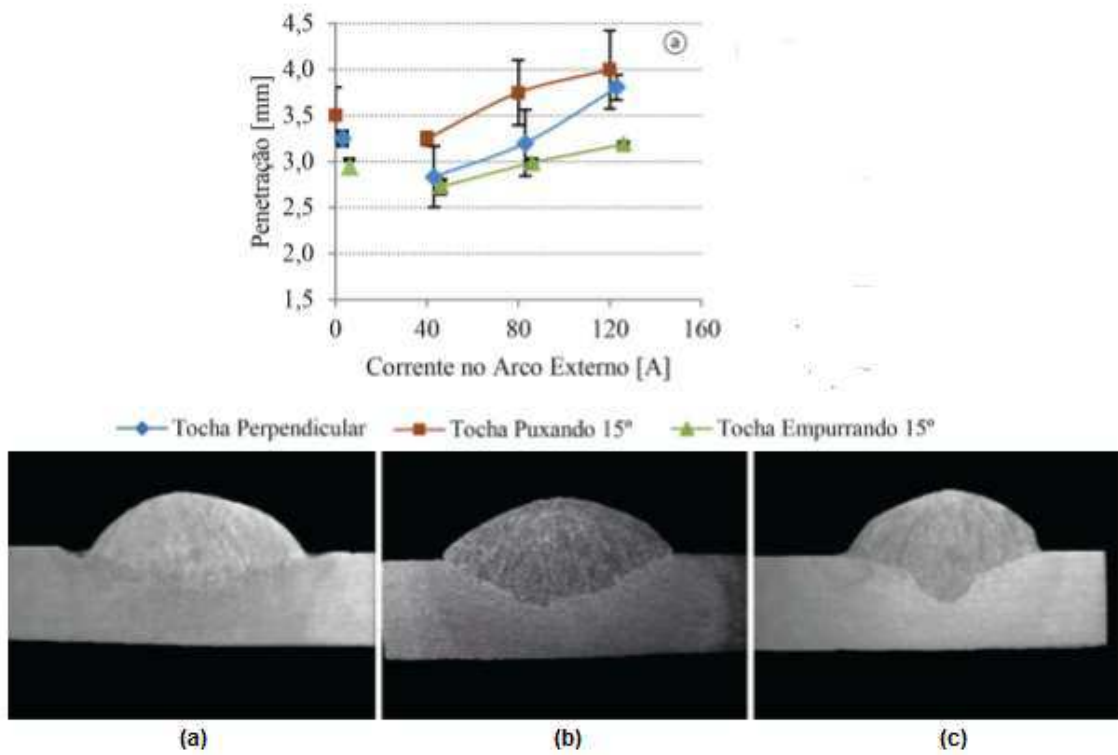
Tabela 4 - Influência dos ângulos de ataque da tocha de soldagem

Ângulo	Soldagem	Característica
Ângulo de Ataque Empurrando		<ul style="list-style-type: none"> • Menor Penetração • Cordão de solda mais plano e largo
Ângulo de Ataque Puxando		<ul style="list-style-type: none"> • Maior Penetração • Cordão de solda mais estreito e convexo
Ângulo Neutro		<ul style="list-style-type: none"> • Características dos cordões intermediárias anteriores

FONTE: adaptado Infolsolda (1997)

Em um estudo sobre a influência de fatores como: níveis de corrente, ângulo de inclinação da tocha e distância entre a peça e a tocha, Resende e Scotti (2015), constaram por meio de experimentos a influência dos ângulos de ataque na geometria do cordão de solda no processo Plasma – MIG. Neste estudo observaram que ao se utilizar o ângulo de ataque no sentido empurrando há uma diminuição na penetração do cordão de solda em relação a tocha de soldagem na posição perpendicular e da mesma forma se constata um aumento na penetração da solda se o sentido for puxando, Figura 18.

Figura 17 - Resultados da penetração em relação à inclinação da tocha de soldagem. (a) empurrando, (b) perpendicular, (c) puxando.



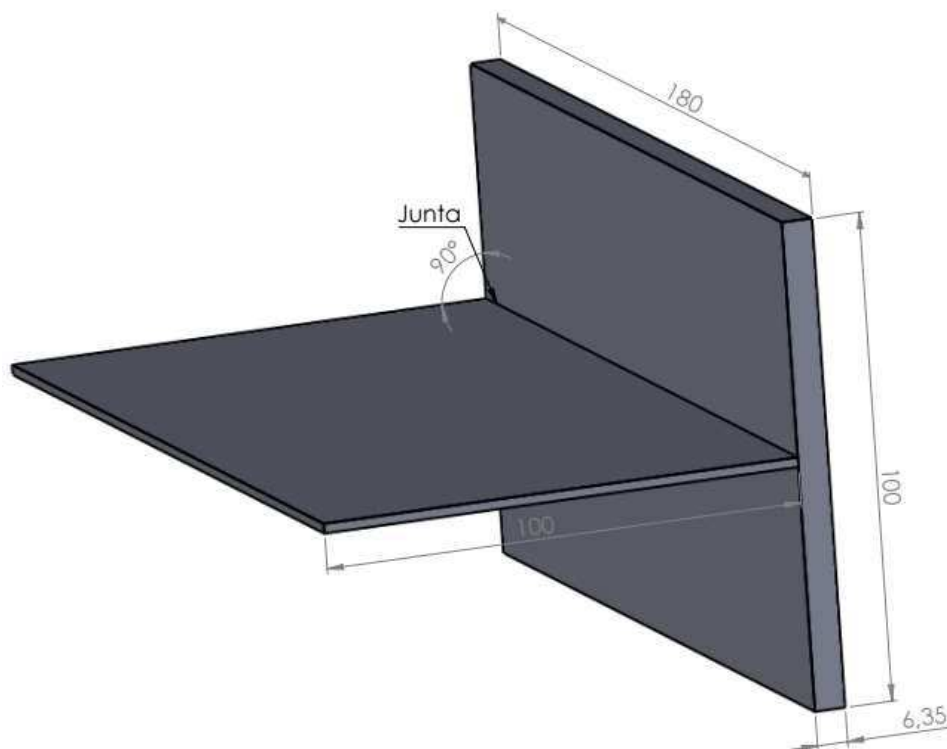
FONTE: adaptado de Resende e Scotti (2015).

3 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os corpos de prova foram construídos a partir de chapas de aço ABNT 1020 em duas espessuras diferentes: 6,35 mm e 2 mm, Figura 19. Ambas as chapas foram cortadas em tamanho padrão de 100 x 180 mm e, na sequência foram unidas por dois pontos de solda localizados nas extremidades oposta da junta a ser soldada.

Figura 18 - Características Geométricas dos Corpos de Prova



O arame AWS ER70S-6, de 1,0 mm de diâmetro e composição química apresentada pela tabela 4, foi o material de adição usado para soldar os corpos de prova. Este arame de cobertura cobreada é classificado pela norma DIN 8559 e pela norma AWS A 5.18. Ele foi selecionado pela sua indicação para a soldagem de aços de baixo carbono em todas as posições e por ser largamente utilizado na indústria.

Tabela 5 - Composição química do arame ER70S-6 em valores percentuais.

C	Si	Mn	P	S	Cu
0,06 - 0,15	0,80 - 1,15	1,40 - 1,85	$\leq 0,02$	$\leq 0,03$	$\leq 0,50$

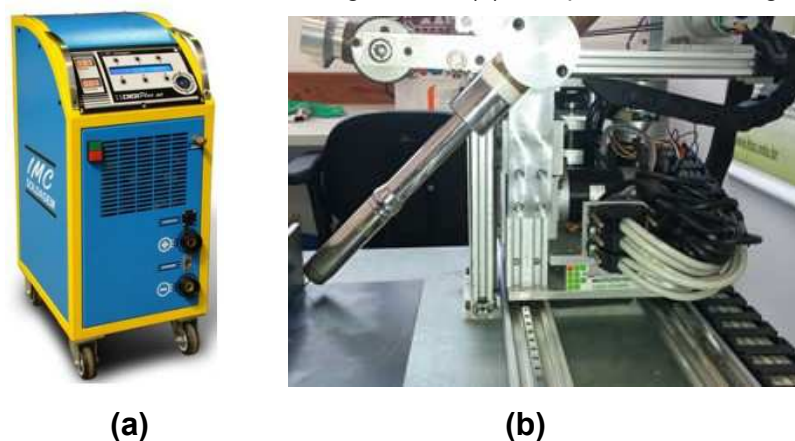
FONTE: Adaptado ESAB

O gás de proteção usado foi uma mistura gasosa de 98%Ar+2%O₂, com vazão de 15 l/min. Esta mistura foi escolhida, em razão, de que adição de pequeno percentual de oxigênio melhora a estabilidade do arco, aumenta a taxa de fusão, diminui a corrente de transição para transferência por spray, melhora a molhabilidade e o perfil do cordão se comparado com misturas de Ar e CO₂.

3.2 EQUIPAMENTOS

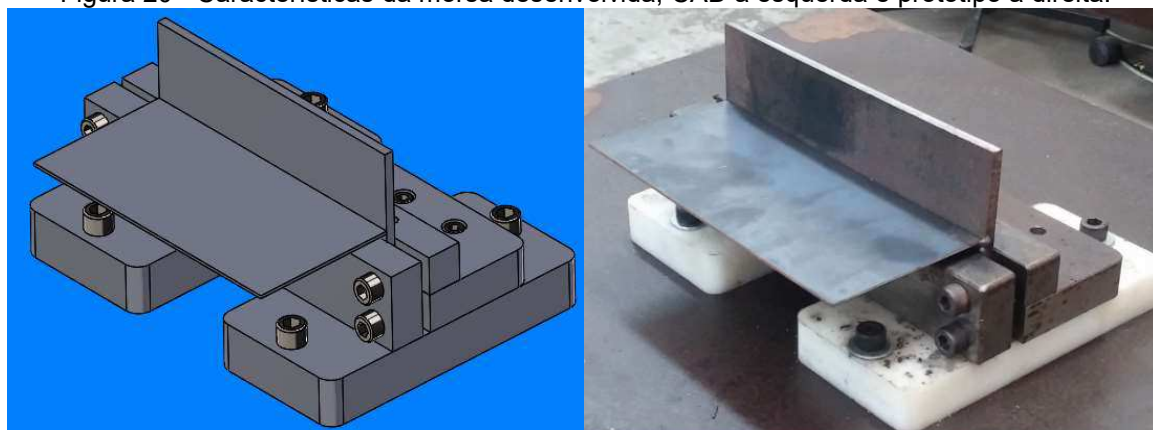
Para a soldagem dos corpos de prova foi utilizada a fonte microprocessada de soldagem marca IMC modelo Digiplus A7, Figura 20a, operando em modo corrente constante no processo GMAW. A tocha de solda usada foi a modelo automática refrigerada TBI AUT 511 com capacidade de 450 A em regime contínuo. Para a realização das trajetórias de soldagem dos corpos de prova foi usado o manipulador cartesiano de cadeia cinemática mista com 5 graus de liberdade (eixos lineares X, Y e Z e eixos angulares A e B), Figura 20b. A marcação dos pontos, a parametrização das trajetórias de soldagem e o seu respectivo envio para os drivers dos motores de cada eixo são tarefas realizadas pelo operador via o programa específico em linguagem C++ que usa a porta paralela de um PC como interface dos sinais de entrada e de saída do manipulador, (PIRES, 2014; HUBBERT,2014).

Figura 19 - (a) Fonte de soldagem ICM. (b) Manipulador de soldagem



Prevendo-se que com o calor gerado durante a soldagem, os corpos de prova sofreriam deformações térmicas e que, tais deformações poderiam causar um afastamento entre as chapas a serem soldadas, e desta forma, comprometer a veracidade dos experimentos, foi projetado e construído um sistema de fixação específico composto de quatro peças usinadas em aço ABNT 1020, sendo composta por dois mordentes, um fixo e um móvel com 24 mm de espessura e 270 mm de comprimento. Este sistema foi fixado a uma placa usinada em material polimérico de 30 mm de espessura afim de isolar eletricamente a morsa da mesa de soldagem, Figura 21.

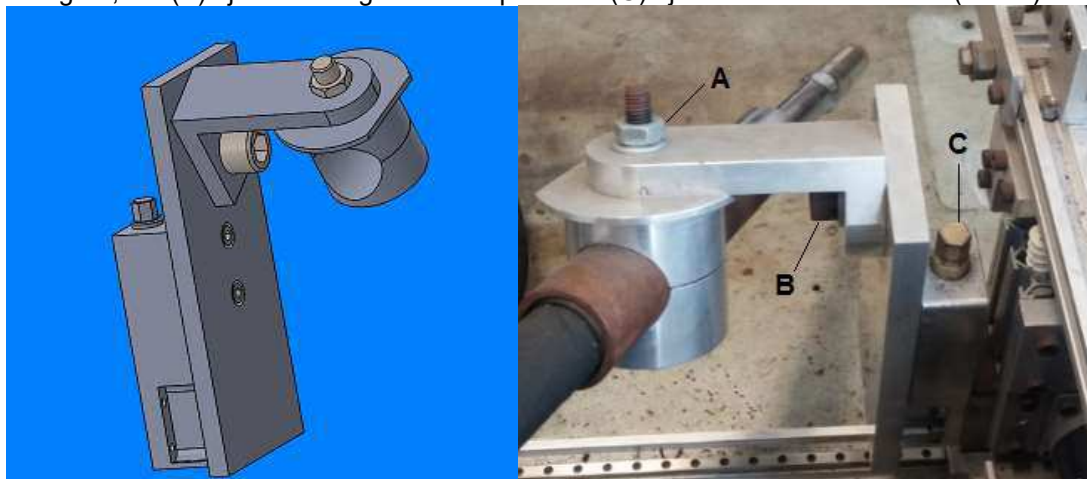
Figura 20 - Características da morsa desenvolvida, CAD à esquerda e protótipo à direita.



Em testes de posicionamento realizados com o manipulador cartesiano de cadeia cinemática mista com 5 graus de liberdade foi observado que em virtude de desgastes de alguns componentes responsáveis pelo posicionamento dos eixos A e B, o mesmo não mantinha o posicionamento da tocha nos ângulos de sentido de

soldagem e de ataque. Por esta razão foi projetado e construído um dispositivo com ajuste manual de três graus de liberdade, sendo um linear e dois angulares, Figura 22.

Figura 21 - CAD e foto do dispositivo de três graus de liberdade. Em (A) ajuste do ângulo de sentido de soldagem, em (B) ajuste do ângulo de ataque e em (C) ajuste da altura da tocha (eixo z).



O dispositivo construído é composto por dois sistemas. O sistema de orientação da tocha foi construído todo em alumínio com o intuito de propiciar redução de peso, visto que o mesmo foi fixado na lateral do manipulador, eixo linear x, por meio de porcas e parafusos. O sistema de posicionamento vertical da tocha é composto por um fuso usinado em latão e uma porca fabricada de ferro fundido cinzento, com o intuito de evitar o enrustimento dos componentes.

Com a construção deste dispositivo foi possível orientar os ângulos de sentido e de ataque e também posicionar a tocha de soldagem em relação a junta. Concluída esta etapa iniciou-se a soldagem dos corpos de prova.

Após a soldagem os corpos de prova foram cortados na máquina de eletroerosão a fio, marca Charmilles (modelo FW – 1), Figura 23a. Na sequência as secções transversais das juntas foram lixadas, polidas e atacadas com solução de iodo para a obtenção das respectivas macrografias. O estereoscópico marca Zeiss modelo Stemi 2000C, Figura 23b, foi o equipamento usado nas macrografias para efetuar a medição dos parâmetros geométricos da secção transversal de cada junta soldada.

Figura 22 - (a) Máquina de eletroerosão a fio Charmilles (b) Estereoscópio Zeiss



(a)

(b)

FONTE: Primária (2016)

3.3 METODOLOGIA

A junta a ser soldada é em ângulo do tipo “T”, formada pela interseção da chapa mais espessa vertical com a chapa menos espessa horizontal, conforme mostra a Figura 19. Em cada corpo de prova foram realizados cordões de solda de 160 mm de comprimento no centro do corpo de prova, respeitando 10 mm de comprimento sem solda em ambas as extremidades dos corpos de prova.

Para a execução dos cordões nos corpos de prova foram utilizados três diferentes tipos de trajetórias de soldagem. A primeira trajetória de soldagem foi a linear, que é a mais utilizada em procedimentos industriais. Sua principal vantagem é a possibilidade de ser realizada por equipamentos de movimentação da tocha de baixa dinâmica. Para este caso, a velocidade da tocha é igual à velocidade de soldagem.

A segunda trajetória de soldagem utilizada foi a oscilação longitudinal (*switch back*) com velocidade da tocha constante e igual a três vezes a velocidade de soldagem, conforme a equação (9) obtida no capítulo anterior. A terceira e última trajetória de soldagem empregada foi também com oscilação longitudinal, entretanto, com velocidades de avanço e de recuo da tocha diferentes: $va = 4.vr$, $va = 6.vs$ e $vr =$

1,5.*vs.* Nos últimos dois tipos de trajetória de soldagem foram usadas a técnica *switch back* de três passes, $da=2.dr$, com valores constantes de distância de avanço, $da=10$ mm, e de distância de retorno, $dr=5$ mm.

Em função da velocidade máxima do alimentador automático de arame da fonte de soldagem, $V_{m\acute{a}x}=20$ m/min, foi usada uma constante igual a 16 para a relação entre as velocidades de alimentação do arame e a média de soldagem, equação 12. Essa estratégia foi aplicada para garantir a mesma quantidade de material depositada por unidade de comprimento. Assim, foi possível fazer uniões com transferência metálica por spray em uma faixa de velocidade média de soldagem de 0,50 m/min até 1,25 m/min.

$$\frac{va}{vs} = 16$$

(12)

3.3.1 CRITÉRIOS PARA VALIDAÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA

Para a validação dos cordões de solda realizados nos corpos de prova, Figura 19, foi utilizada como base as normas ISO de soldagem, Figura 24. Estas normas podem ser utilizadas para variados tipos de peças soldadas pelo processo GMAW, inclusive é utilizada na soldagem de componentes estruturais automotivos. Ela define as dimensões exigidas para a soldagem de chapas por GMAW, levando em consideração as espessuras das chapas (t_1 e t_2), a largura de penetração (L_1 e L_2) e a mordedura (U_1 e U_2) em cada chapa, a garganta (a), a folga b e os ângulos (α e β) formados entre o cordão de solda e a peça.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO $i=f(v_a)$ PARA A TRANSFERÊNCIA METÁLICA SPRAY

Por meio de sucessíveis experimentos, depositando um cordão em forma de filete sobre uma chapa plana, conforme mostrado na figura 25, obteve-se a transferência por spray. O arame usado foi o ER70S-6 de 1mm de diâmetro com a fonte de soldagem operando em modo corrente. A corrente elétrica de transição obtida neste ensaio foi de 172 A para 8 m/min de velocidade do arame. Neste ensaio, a velocidade de soldagem foi de 0,50 m/min com uma DPCP de 20 mm. Na literatura, SCOTTI e PONOMAREV (2008), o valor relatado é 180 A. O resultado encontrado é bem próximo ao da literatura e a pequena diferença encontrada no valor da corrente pode estar relacionada às características do arame, ou o gás de proteção utilizado ou na calibração da máquina, entre outros.

Figura 24 - Foto do ensaio realizado para determinar a corrente de transição.



Com o objetivo de determinar a equação da corrente de transição em função da velocidade de arame repetiu-se o referido ensaio para as velocidades de soldagem

de 0,75 m/min e 1,00 m/min. Assim, foram obtidas as correntes elétricas de 220 A e 268 A para as velocidades de alimentação de arame de 12 m/min e de 16 m/min respectivamente.

Os coeficientes da equação da corrente elétrica de soldagem em função da velocidade de arame, $i=f(va)$, foram obtidos via o método dos mínimos quadrados para um polinômio de segundo grau:

$$i = f(va) = a_0 + a_1.va + a_2.va^2 \quad (13)$$

Os valores dos coeficientes a_0 , a_1 e a_2 foram determinados com base nos pontos obtidos experimentalmente ($P_1(8,172)$, $P_2(12,220)$ e $P_3(16,268)$) via a seguinte equação:

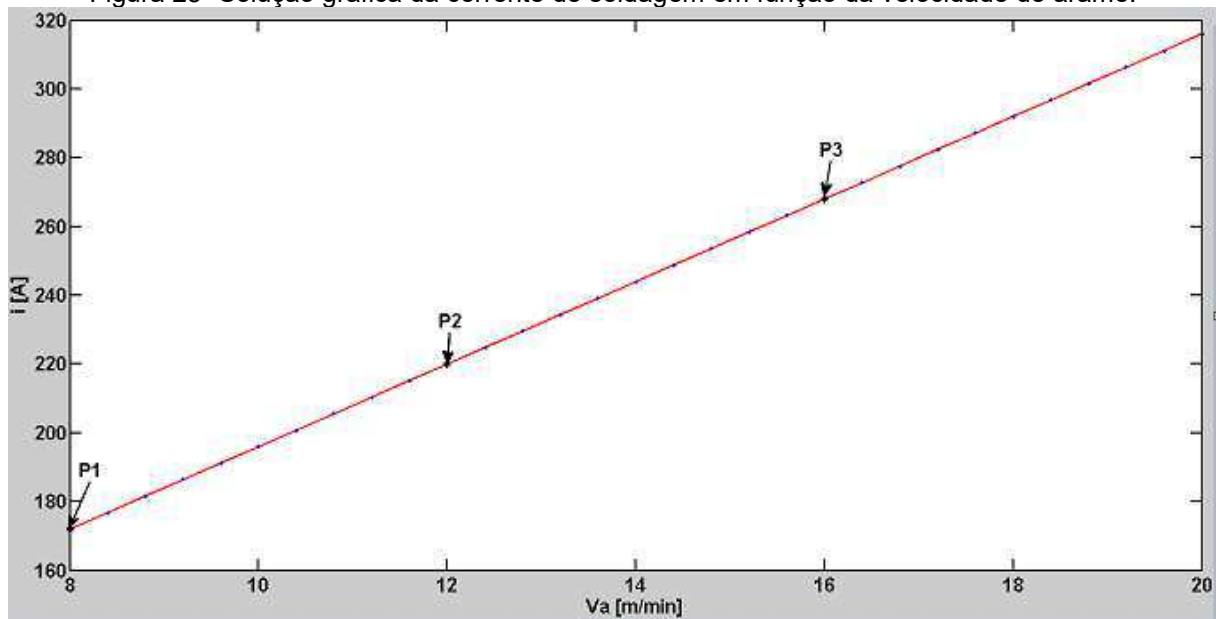
$$A = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = (Va^T.Va)^{-1}.Va^T.I \quad (14)$$

Onde:

$$Va = \begin{bmatrix} 1 & va_1 & va_1^2 \\ 1 & va_2 & va_2^2 \\ 1 & va_3 & va_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 8 & 8^2 \\ 1 & 12 & 12^2 \\ 1 & 16 & 16^2 \end{bmatrix} \text{ e } I = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 172 \\ 220 \\ 268 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Resolvendo a equação 14, obteve-se os seguintes valores para os coeficientes: $a_0= 76$ $a_1= 12$ e $a_2 = 0$. A solução gráfica correspondente é apresentada na Figura 26.

Figura 25- Solução gráfica da corrente de soldagem em função da velocidade de arame.



Na sequência a morsa foi instalada na bancada de soldagem e um corpo de prova foi fixado na mesma. A seguir o dispositivo de orientação e posicionamento de três graus de liberdade foi fixado rigidamente no eixo x do manipulador de soldagem. Por fim a tocha de soldagem foi fixada na extremidade deste dispositivo.

4.2 DETERMINAÇÃO DA ORIENTAÇÃO E POSIÇÃO DA TOCHA

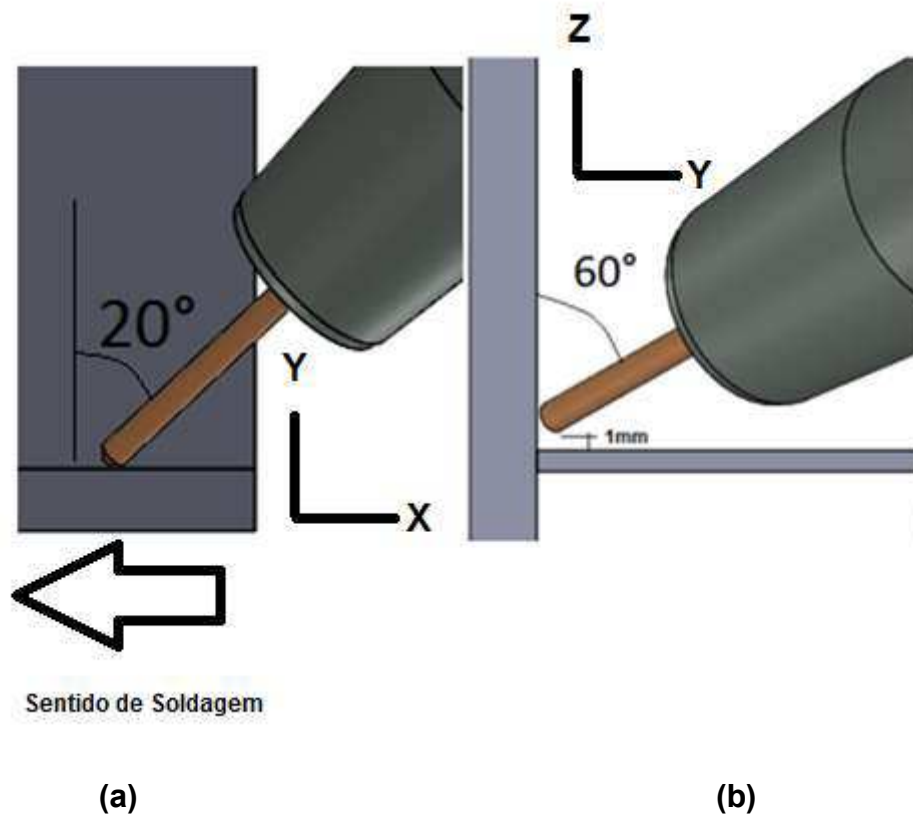
Conforme literatura, a orientação de inclinação da tocha tem grande influência nas características geométricas do cordão de soldagem. Neste sentido, foram realizados experimentos para determinar os ângulos com velocidade de soldagem de 0,5m/min que é comumente utilizada por um soldador experiente para este tipo de junta (DUTRA *et al.*, 2013). Na sequência, cada experimento foi analisado por macrografia com base nos critérios de aceitabilidade das normas ISO. Com o objetivo de determinar o correto valor do ângulo no sentido de soldagem foi mantido nulo o ângulo de ataque e a ponta do arame foi direcionada para o vértice da junta. O valor inicial foi de 45 graus. A cada experimento este ângulo foi incrementado em 5 graus. Constatou-se que o valor de 60° produzia uma deposição semelhante nas duas chapas porém, com uma mordedura mais acentuada na chapa fina. A solução

encontrada que resolveu este problema foi a de elevar em 1mm a ponta do arame em relação ao vértice da junta, Figura 27b.

A seguir, foram realizados ensaios de soldagem com o objetivo de definir o ângulo de ataque para minimizar as mordeduras e as penetrações nas chapas.

O valor inicial foi o de 5 graus empurrando. A cada experimento este ângulo foi incrementado de 5 graus. O valor de 20 graus, Figura 27a, produziu o melhor resultado com base nas normas ISO de soldagem.

Figura 26 - Em (a) ângulo de ataque e em (b) ângulo de sentido de soldagem e o afastamento vertical.






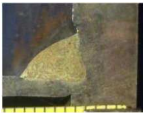
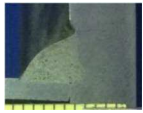
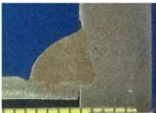
4.3 EXPERIMENTO COM TRAJETÓRIA LINEAR

Após definidas as condições ideais de orientação e posicionamento da tocha para a soldagem dos corpos de prova realizou-se os experimentos com a estratégia da trajetória linear da tocha de soldagem. O intervalo de experimentos com esta

estratégia iniciou-se com a velocidade de 0,5m/min. Para cada novo experimento realizado fora incrementado 0,1m/min na velocidade de soldagem.

A tabela 7 apresenta os resultados obtidos com a trajetória linear. Nesta estão descritos para cada união realizada: o valor aplicado de velocidade de soldagem, os valores medidos de tensão e de corrente média de soldagem, o valor calculado da energia de soldagem, a macrografia e os valores medidos de seus oito parâmetros conforme a Figura 24.

Tabela 7 - Experimentos realizados com trajetória tradicional

Parâmetros e Secções Transversais	Experimentos					
	União 1	União 2	União 3	União 4	União 5	União 6
V _m (m/min)	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
I _m (A); V _m (V)	170 ; 25,0	187 ; 25,8	206 ; 27,5	226 ; 29,3	245 ; 30,6	263 ; 31,3
H (kJ/cm)	5,12	4,82	4,84	4,98	5,00	4,93
Macros						
a ; b (mm)	4,25 ; 0,01	4,68 ; 0,05	4,92 ; 0,01	4,70 ; 0,01	4,85 ; 0,07	4,50 ; 0,08
L1 ; L2 (mm)	4,13 ; 6,18	4,22 ; 5,55	4,34 ; 5,09	4,89 ; 5,21	4,56 ; 5,07	4,94 ; 4,57
U1 ; U2 (mm)	0,00 ; 0,36	0,10 ; 0,26	0,21 ; 0,60	0,14 ; 0,48	0,17 ; 0,59	0,39 ; 0,33
α ; β (°)	128 ; 138	125 ; 128	114 ; 118	124 ; 128	121 ; 120	117 ; 138

FONTE: Primária (2016)

Como observado na Tabela 7, as uniões aprovadas segundo os critérios das normas ISO são da primeira com velocidade de soldagem de 0,5 m/min à quinta com 0,9 m/min.

Esta última aprovada, com velocidade de soldagem de 0,9 m/min, teve os valores de ambas as mordeduras muito próximas da reprovação. Assim, essa velocidade de soldagem foi considerada o limite de produção para a trajetória linear tradicional.

Este aumento progressivo de mordedura pode estar relacionado, como descrito em literatura. Com o aumento da corrente em consequência da força magnética na região da solda e também pelo aumento na velocidade de propagação das partículas expelidas.

As macrografias dos corpos de prova apresentadas na tabela 7 revelam que o aumento da velocidade alterou significativamente a geometria do cordão, observa-se que os cordões soldados com maior velocidade de soldagem tendem a serem mais convexos e em consequência há uma redução nos ângulos (α e β) das bases das soldas. Com a diminuição destes ângulos há um aumento da incidência de tensões residuais.



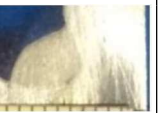
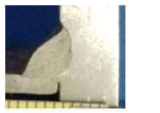
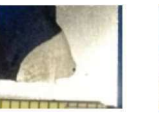
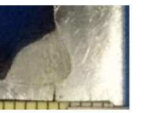
Nos experimentos realizados pode ser observado também que houve uma distribuição mais uniforme do material de deposição, visto que, os comprimentos das penetrações (L1 e L2) apresentam dimensões cada vez mais próximas com o aumento da velocidade de soldagem.

Os valores referentes a energia de soldagem calculada para cada união, Tabela 7, se apresentam muito próximos. No entanto, observa-se que há uma tendência ao aumento da mordedura e da penetração na junta. Este resultado evidencia o supracitado a respeito da relação entre o aumento da potência elétrica de soldagem com o incremento na penetração e na mordedura.

4.4 EXPERIMENTOS COM TRAJETÓRIA SWITCH BACK

Conhecendo a velocidade limite para a soldagem com trajetória linear, partiu-se desta como velocidade inicial para a utilização das técnicas com *switch back*, Tabela 8. Os resultados iniciais foram obtidos com a utilização de *switch back* com velocidade constante união: 10, união 11 e união 12. Na sequência estão os resultados obtidos com *switch back* com velocidade variável: união 13, união 14 e união 15.

Tabela 8 - Resultados obtidos com as trajetórias do tipo switch back velocidade contínua e *switch back* com velocidade variável

Parâmetros e Secções Transversais	Experimentos com $va = vr$			Experimentos com $va = 4.vr$		
	União 7	União 8	União 9	União 10	União 11	União 12
V_{sm} (m/min)	0,90	0,95	1,00	0,90	0,95	1,00
I_m (A); V_m (V)	246 ; 29,7	261 ; 31,1	263 ; 28,4	246 ; 29,0	261 ; 29,4	263 ; 29,5
H (kJ/cm)	4,87	5,14	4,47	4,76	4,86	4,66
Macros						
a ; b (mm)	4,74 ; 0,12	4,55 ; 0,02	4,24 ; 0,15	4,18 ; 0,30	5,20 ; 0,05	4,42 ; 0,18
L1 ; L2 (mm)	4,34 ; 5,65	4,52 ; 4,98	4,53 ; 4,40	4,73 ; 4,47	4,60 ; 4,20	4,80 ; 4,58
U1 ; U2 (mm)	0,17 ; 0,34	0,09 ; 0,37	0,25 ; 0,15	0,13 ; 0,31	0,14 ; 0,59	0,33 ; 0,16
α ; β ($^\circ$)	130 ; 126	120 ; 120	119 ; 108	125 ; 124	125 ; 102	124 ; 117

FONTE: Primária (2016)

Observa-se pelos dados apresentados na Tabela 8 que independente da estratégia empregada, o aumento da potência elétrica tende a aumentar a profundidade das mordeduras, mesmo que sejam mantidas próximas as energias de soldagem resultantes.

A convexidade do cordão de solda é também aumentada com o aumento da velocidade de soldagem utilizadas e em consequência há uma redução nos valores dos ângulos α e β .

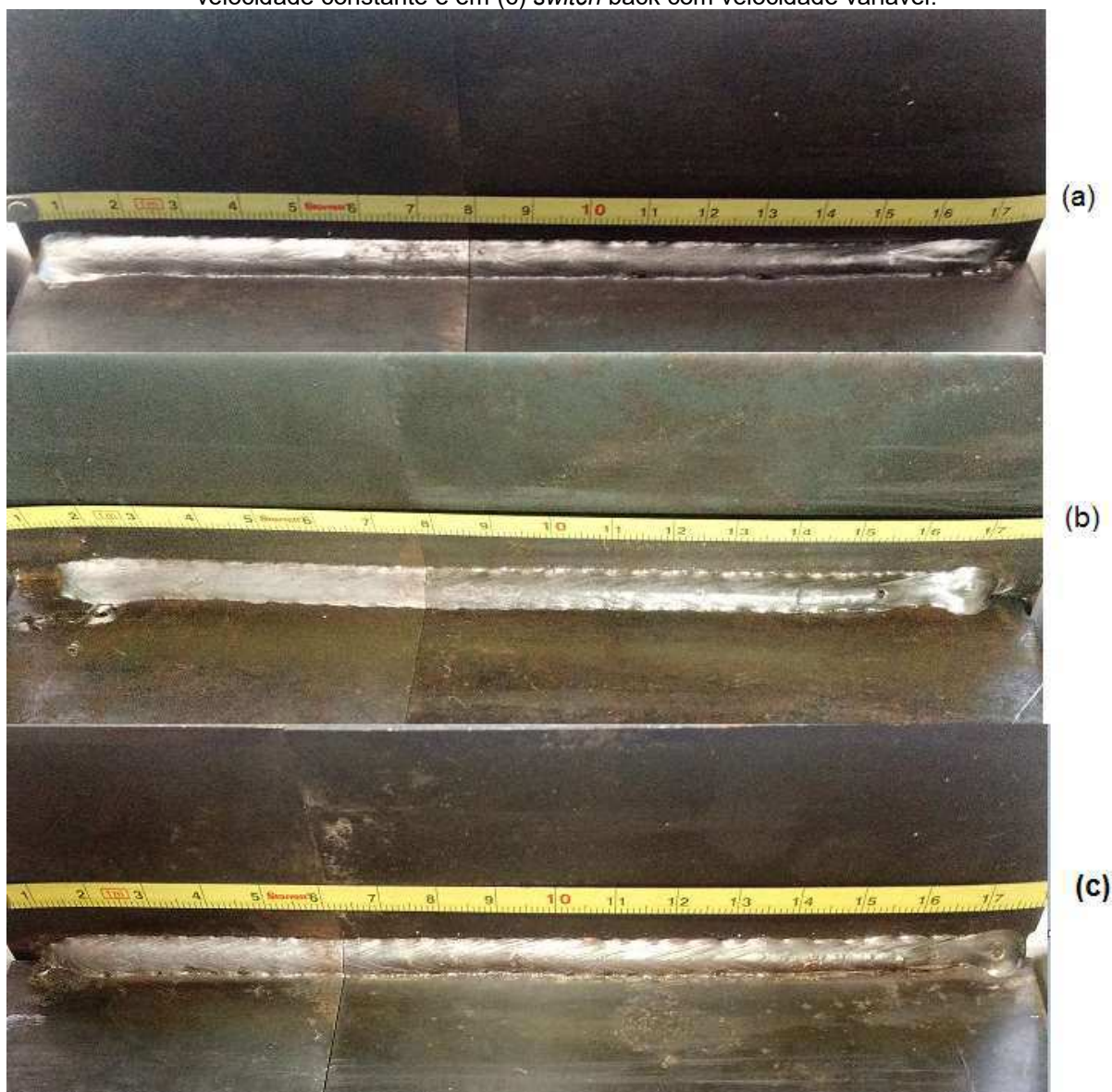
Analisando os resultados obtidos com a mesma velocidade de deslocamento da tocha 0,9 m/min constata-se que quando se utilizou trajetórias com *switch back* houve diminuição em ambas as mordeduras em comparação a estratégia linear tradicional.

A maior velocidade de soldagem obtida nos experimentos, atendendo os requisitos determinados neste trabalho foi de 0,95 m/min utilizando-se *switch back* com velocidade constante.

Em relação aos aspectos visuais dos cordões de solda nota-se que a utilização da trajetória linear contínua resulta em um cordão de superfície praticamente lisa.

Utilizando-se estratégias *switch back* aumenta-se a rugosidade na superfície do cordão, em razão da movimentação da tocha. Esta rugosidade é mais incidente quando há aumento na velocidade de deslocamento da tocha, Figura 28.

Figura 27 - Aspectos visuais dos cordões soldados. Em (a) linear tradicional, em (b) *switch back* com velocidade constante e em (c) *switch back* com velocidade variável.



FONTE: Primária (2016)

5 CONCLUSÕES

Os dispositivos construídos se mostraram de grande eficiência, para o procedimento da união. A flexão da chapa grossa durante a soldagem da junta foi minimizada pelo uso da morsa de fixação dos corpos de prova. As variações de posição e orientação da tocha foram também minimizadas com o uso do dispositivo de três graus de liberdade fixado rigidamente ao eixo X do manipulador de soldagem.

Nos ensaios realizados ficou evidenciado a importância da correta orientação da tocha de soldagem definida pelos ângulos: de sentido de soldagem e de ataque. Uma pequena alteração dos valores ajustados experientemente proporciona aumento das mordeduras e, com isso, a diminuição da produção.

A posição da tocha em relação a junta mostrou-se ter grande importância no procedimento de soldagem. Com um pequeno deslocamento vertical de 1 mm em relação a junta, conseguiu-se uma deposição de material na chapa mais idêntica.

Os resultados obtidos demonstraram que a utilização da estratégia *switch back* na soldagem de juntas em ângulo 90° proporciona a redução da amplitude das mordeduras.

O aumento da velocidade de solda contribui para o aumento da convexidade dos cordões. Cordões com convexidade maior tendem a diminuir o ângulo entre a base da solda e o cordão, o que pode acarretar no aumento das tensões residuais e diminuir a resistência das soldas.

Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que não houve aumento significativo da produção com o uso da técnica *switch back*, nas condições testadas neste trabalho, para a união em ângulo entre chapas de espessuras dissimilares. Somente a técnica *switch back* com velocidade constante teve um ganho de produção de aproximadamente 5%. Cabe frisar que o ganho de produção de 60% obtido por Almeida *et al.* (2012) não considera critérios de qualidade para aprovação das uniões, não mantêm a mesma quantidade de material depositado sobre a junta e não usa

ângulo de ataque empurrando para incrementar a velocidade de soldagem na trajetória do tipo linear.

Considerando o supracitado sugere-se em trabalhos futuros a realização de estudos a fim de verificar a contribuição da utilização de trajetórias com *switch back* para a união de juntas de sobrepor considerando critérios de qualidade, mantendo-se a mesma quantidade de material depositado nas juntas e adotando ângulo de sentido de soldagem e de ataque, visando aumento da produção.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, H. A. D.; MOTA, C. A. M. D.; SCOTTI, A. Efeitos do Comprimento de reversão e do ângulo de ataque sobre a estrutura de solidificação do cordão em soldagem MIG/MAG. **ABS**, p. 13, 2011.

AUTO CHASSIS INTERNATIONAL. Arc Welding Standard Assembly Of Stell Csis Parts Using MAG Process. **Auto Chassis International**, 01 Agosto 2003.

BALMER. **Apostila de Treinamento MIG/MAG (GMAW)**. Ijuí, p. 14. 2015.

BONACORSO, N. G. et al. Desenvolvimento de uma Célula de Fabricação Automatizada para Soldagem GMAW dos Componentes Estruturais das Rodas Metálicas de Tratores Agrícolas. **ABS**, Natal, p. 9, Outubro 2011.

DOBIGNIES, A. A.; OKIMOTO, P. C.; GUIMARÃES, B. **ESTUDO DO RENDIMENTO DE DEPOSIÇÃO DE MATERIAL NA SOLDAGEM MIG/MAG EM CONDIÇÕES DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO FORÇADO**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 1-9.

DUTRA, J. C. et al. The synchronized polarity gas metal arc welding technique shows promise for applying coatings where the risk of perforating the base material is a critical factor. **Welding Journal**, Florianópolis, p. 7, Maio 2013.

ESAB. produtividade-soldagem. **ESAB**, 2016. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/produtividade_soldagem.cfm>. Acesso em: 01 Agosto 2016.

FORTES, C. **Apostila de Soldagem MIG/MAG**. ESAB. São Paulo. 2005.

HUBERT, I. L. **DESENVOLVIMENTO MECÂNICO DE UM MANIPULADOR PARA EXECUÇÃO DE PROCEDIMENTOS**. Dissertação de Mestrado - Instituto Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 82. 2014.

IBRAHIM, I. A. et al. The Effect of Gas Metal Arc Welding (GMAW) processes on different. **Procedia Engineering**, Selangor, p. 4, 2012.

IBRAHIM, I. A. et al. The Effect of Gas Metal Arc Welding (GMAW) processes on different welding parameters. **Procedia Engineering**, Selangor, 2012. 4.

INFOSOLDA. Processo mig/mag - Parâmetros de soldagem, São Paulo, 1997. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/174-processo-mig-mag-parametros-desoldagem.html>>. Acesso em: 2016.

KANEKO, Y.; YAMANE, S.; OSHIMA, K. NUMERICAL SIMULATION OF MIG WELD POOL. **Welding in the World**, Saitama, v. 53, p. 9, 2009.

KINDERMANN, R. M. **Sodagem Orbital com Controle Adaptativo por Intermédio de Sensores Laser**. Projeto de Dissertação-Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica-Universidade Federal de Santa catarina. Florianópolis, p. 171. 2016.

MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas**. Florianópolis: [s.n.], v. 1, 1996. 477 p.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 3ª. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009. 363 p.

MENDONÇA, F. K. **Evolução da técnica de sensoriamento de Junta Via Sensoriamento do Arco para Operações de Soldagem em Posições Forçadas**. Dissertação de Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis, p. 125. 2013.

MOREIRA, H. S. **Estudo da Influência dos Parâmetros de Soldagem MIG e da Morfologia do Cordão no Comportamento à Fadiga de Juntas**. São Paulo: [s.n.], 2008.

PEREIRA, A. S.; BUSCHINELLI, A. J. A.; KEJELIN, N. Z. Avaliação da Perfuração na Soldagem em Operação pelo Processo MIG/MAG de Dutos de Alta

Resistência e Baixa Espessura. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, v. 18, p. 235-244, Jul/Set 2013.

PESSOA, A. R. P. et al. Seleção de Parâmetros Através do Método Taguchi para Soldagem de Revestimento com Ligas de Níquel pelo Processo MIG/MAG. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, v. 15, p. 317-324, Outubro 2010.

PIRES, I.; QUINTINO, L.; MIRANDA, M. R. Analysis of the Influence of Shielding Gas Mixtures on the Gas Metal Arc Welding Metal Transfer Modes and Fume Formation rate. **Materials and Design**, Lisboa, p. 9, Março 2007.

PIRES, R. P. **Planejamento e Correção de Trajetória em Manipulador de Soldagem**. Dissertação de Mestrado - Departamento Acadêmico de Metal Mecânica-Mestrado Profissional em Mecatrônica-Instituto Federal de Ciência e Tecnologia. Florianópolis, p. 114. 2014.

PONOMAREV, V.; SCOTTI, A. **Soldagem MIG/MAG Melhor Entendimento Melhor Desempenho**. São Paulo: Artliber, 2008. 284 p.

QUITES, A. M. **Metalurgia em Soldagem**. 1ª. ed. Florianópolis: Soldasolft, 2008. 256 p.

RESENDE, A. A. D.; SCOTTI, A. Influência dos Níveis das Correntes, Ângulo de Inclinação da Tocha e Distância entre a Tocha e a Peça sobre a Geometria do Cordão de Solda Usando “Plasma-MIG” com Arcos Concêntricos. **Soldagem e Inspeção**, Uberlândia, p. 501-514, Dezembro 2015.

SEAS. defectos-internos- en-soldadura-parte1. **SEAS**, 2016. Disponível em: <<http://www.seas.es/blog/varios/defectos-internos-en-soldadura-parte-1/>>. Acesso em: 15 Junho 2016.

Soldagem Automática. **Site da Soldagem Automática**. Disponível em: <http://www.soldaautomatica.com.br/index_arquivos/Arquivos/Automacao%20na%20Soldagem%20-%20UNB.pdf>. Acesso em: 10 Junho 2016.

SOUZA, D.; RESENDE, A. A. D.; SCOTTI, A. Um Modelo Qualitativo para Explicar a Influência da Polaridade na Taxa de Fusão no Processo MIG/MAG. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, v. 14, p. 6, Jul/Set 2009.

SOUZA, D.; SCOTTI, A. **Influência do Aumento da Distância Bico de Contato Peça na Estabilidade do Processo MIG/MAG Operando em Curto Circuito**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 1-2. 2009.

THEFABRICATOR. smooth-movies-with-gmaw. **Thefabricator**, 2016. Disponível em: <www.thefabricator.com/article/arcwelding/smooth-movies-with-gmaw>. Acesso em: 22 jun. 2016.

VIVIANI, A. B. **Integração de um Sensor a Laser a um Manipulador Cartesiano de Soldagem para o Seguimento Automático de Juntas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Pós Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 99. 2015.

WEIZENMANN, G. D. S. **Desenvolvimento de Infra-estrutura para o Estudo dos Efeitos da Oscilação Longitudinal da Tocha de Soldagem (Switch Back) e Avaliação de Desempenho no Processo TIG Autógeno**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 82. 2015.

WIX. Full service. **wix.com**, 2006. Disponível em: <<http://menok.wix.com/indutar#!full-service/stackercoverflowalbum0=2>>. Acesso em: 21 jun. 2016.

YAMANE, S. et al. Application of Switch Back Welding to V Groove MAG Welding, Saitama, p. 408-414, 2010.