

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

MATHEUS DA SILVA AMARAL VIEIRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DA JUNTA
SOBREPOSTA NA PRODUÇÃO DE UNIÕES ENTRE
COMPONENTES ESTRUTURAIS PELO PROCESSO GMAW**

FLORIANÓPOLIS, 2019

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

MATHEUS DA SILVA AMARAL VIEIRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DA JUNTA
SOBREPOSTA NA PRODUÇÃO DE UNIÕES ENTRE
COMPONENTES ESTRUTURAIS PELO PROCESSO GMAW**

Trabalho de conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina como parte dos
requisitos para obtenção de título de
Bacharel em Engenharia
Mecatrônica.

Professor Orientador:
Nelso Gauze Bonacorso, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Vieira, Matheus da Silva Amaral
Estudo da Influencia da Orientação da Junta Sobreposta
na Produção de Uniões Entre Componentes Estruturais pelo
Processo GMAW / Matheus da Silva Amaral Vieira ;
orientação de NelsoGauzeBonacorso.
- Florianópolis, SC,
2019.
52 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Mecatrônica.
Departamento Acadêmico de Metal
Mecânica. Inclui Referências.

1. Avaliação da solda. 2. MIG/MAG. 3. Procedimento
Robusto. 4. Produtividade. 5. Soldagem Robotizada. I.
Bonacorso, NelsoGauze. II. Instituto Federal de Santa
Catarina. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica.
III. Título.

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DA JUNTA SOBREPOSTA NA PRODUÇÃO DE UNIÕES ENTRE COMPONENTES ESTRUTURAIS PELO PROCESSO GMAW

MATHEUS DA SILVA AMARAL VIEIRA

Este trabalho foi julgado adequado para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 4 de julho de 2019

Banca Examinadora:

Nelson Gauze Bonacorso, Dr. Eng. (Orientador)

Erwin Werner Teichmann, Dr. Eng.

Ivan Luiz Hubert, Me. Eng.

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE CURSO

Declaro que o(a) estudante **MATHEUS DA SILVA AMARAL VIEIRA**, matrícula nº **141004681-8**, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado **ESTUDO DA INFLUENCIA DA ORIENTAÇÃO DA JUNTA SOBREPOSTA NA PRODUÇÃO DE UNIÕES ENTRE COMPONENTES ESTRUTURAIS PELO PROCESSO GMAW**, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis.

Florianópolis, 01 de AGOSTO de 2019.



Prof. Orientador do TCC: Nelso Gauze Bonacorso

Dedico este trabalho a Deus, a minha
família, ao meu orientador e a todos
os professores que tive a
oportunidade de ser aluno.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Rogério Mauro Vieira e Nilceia da Silva Amaral Vieira, pela criação, pela educação, pelo incentivo e pelo apoio que têm me dado, e atualmente o que eu sou devo muito a eles.

Ao professor Nelson Gauze Bonacorso, por toda a orientação proporcionada para a elaboração e aperfeiçoamento do presente trabalho e também pelos conhecimentos fornecidos durante toda a graduação.

Aos professores membros da banca Ivan Luiz Hubert e Erwin Werner Teichmann pelas contribuições e melhoramentos sugeridos ao trabalho.

A todos os alunos das turmas da 9ª fase 2018/2 e 2019/1 por ajudarem na preparação dos corpos de provas.

A todos os professores pelos ensinamentos fornecidos que contribuíram para a minha formação.

“A competitividade de um país não
começa nas indústrias ou nos
laboratórios de engenharia. Ela
começa na sala de aula.”
(Lee Iacocca)

RESUMO

Pela sua simplicidade de preparação, as juntas de soldagem do tipo sobreposta são comumente usadas para a união de componentes estruturais na fabricação de peças metálicas. Tradicionalmente, as juntas sobrepostas são soldadas pelo processo GMAW de forma manual ou automática na posição de soldagem horizontal e com orientação em 0° da junta, caso em que a sua menor aresta está na vertical. Porém, algumas indústrias de fabricação preferem manter a posição horizontal de soldagem com a orientação de 90° da junta, principalmente na soldagem simultânea de duas juntas sobrepostas localizadas em lados opostos da peça. Com base nestas observações, a presente monografia investiga em primeiro lugar, qual das duas orientações da junta sobreposta, 0° ou 90° , proporciona maior produtividade e, em segundo lugar, se há outra orientação e/ou posição de soldagem que resulte em maior produção. Para isso, uma fonte de soldagem digital, uma mesa basculante com dispositivo de fixação e um robô industrial foram utilizados para realizar as uniões com velocidade de soldagem na faixa de 0,6 a 1,3 m/min. Na sequência as respectivas macrografias foram produzidas e avaliadas de acordo com o aspecto visual e com base nos critérios das normas ISO. Os resultados obtidos evidenciaram que a orientação mais produtiva é a nula com 1,0 m/min de velocidade máxima de soldagem e que as orientações negativas também são tão produtivas quanto à orientação nula.

Palavras-chave: Avaliação da solda. MIG/MAG. Procedimento Robusto. Produtividade. Soldagem Robotizada.

ABSTRACT

Due to their simplicity of preparation, welding joints of the overlapping type are commonly used for the joining of structural components in the manufacture of metal parts. Traditionally, lap joints are welded by the GMAW process either manually or automatically in the horizontal welding position and with a 0 orientation of the joint, in which case their smallest edge is vertical. However, some manufacturing industries prefer to maintain the horizontal welding position with the 90 orientation of the joint, especially in the simultaneous welding of two lap joints located on opposite sides of the part. On the basis of these observations, this monograph investigates firstly which of the two lap joint orientations, 0° or 90°, provides higher productivity, and secondly, if there is another orientation and/or welding position that results in higher production. For this purpose, a digital welding source, a tilting table with clamping device and an industrial robot were used to make the joints with a welding speed in the range of 0.6 to 1.3 m/min. Subsequently the respective macrographs were produced and evaluated according to the visual aspect and based on the ISO standards. The results showed that the most productive orientation is zero with 1.0 m/min of maximum welding speed and that negative orientations are also as productive as zero orientation.

Keywords: Weld Evaluation. MIG/MAG. Robust Procedure. Productivity. Robotized Welding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo GMAW, em (a) manual e em (b) automático.....	14
Figura 2 - Principais orientações das juntas sobrepostas em perspectiva isométrica..e vista lateral, em (a) 0° e em (b) 90°	15
Figura 3 - Principais componentes de uma célula de fabricação GMAW.....	18
Figura 4 - Em (a) a representação esquemática do processo GMAW e em (b) a foto do arco na polaridade positiva	19
Figura 5 - Tipos de Transferências Metálicas	21
Figura 6 - (a) Cordão de Solda com falta de penetração e (b) Cordão de Solda com mordedura	21
Figura 7 - Curva Característica de uma fonte de Tensão constante (CV).....	22
Figura 8 - Curva Característica de uma fonte de corrente constante (CI)	23
Figura 9 - Penetração Padrão por tipo de gás de proteção	24
Figura 10 - Cordão de solda cheio de poros devido à falta de gás de proteção.....	25
Figura 11 - DBCP	25
Figura 12 - Efeito da orientação do eletrodo na morfologia do cordão de solda	27
Figura 13 - Ângulo de sentido de soldagem	28
Figura 14- O corpo de prova	29
Figura 15 - Célula robotizada de soldagem.....	30
Figura 16 - Em (a) a máquina de eletroerosão a fio, (b) a lixadeira metalográfica e em (c) o mini <i>Studio</i> de fotografia.....	31
Figura 17 -- Ângulos de orientação da junta sobreposta do corpo de prova e do sentido de soldagem da tocha: (a) 0° e 30°, (b) 30° e 0°, (c) 90° e 60°, (d) -20° e 50°, (e) -45° e 75°, (f) -90° e 120°	32
Figura 18 - Formato do preenchimento da junta.....	32
Figura 19 - Croqui da trajetória de soldagem das juntas sobrepostas.....	34
Figura 20 - O Programa do robô na tela do seu terminal de programação (<i>teach pendant</i>).....	35
Figura 21 - O programa CAD <i>Solidworks</i> para a medição dos parâmetros geométricos das uniões	36

Figura 22 - Parâmetros relacionados nas normas ISO com base na espessura da chapa mais fina, t_1	37
Figura 23 - Junta sobreposta soldada com falta de material de adição: (a) macrografia e (b) na foto do cordão	38
Figura 24 - Dimensionamento da área de deposição, circular na junta superior e triangular na inferior.....	38
Figura 25 - Falta de penetração gerada por soldagem empurrando.....	39
Figura 26 – Em (a) o problema de porosidade no cordão de solda e em (b) a solução utilizada	39
Figura 27 - Em (a) Junta orientada a -90° e em (b) cordão de solda com escorrimento da poça de fusão devido a efeito da força	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do material de base e de adição em valores percentuais.....	29
Tabela 2- Parâmetros usados para programação do robô industrial e a fonte de soldagem.....	34
Tabela 3 - Valores admissíveis aplicados aos critérios de qualidade da solda de união para espessuras: $t=t_1=t_2= 3,75$ mm.....	37
Tabela 4 - Resultados das soldagens das juntas sobrepostas na orientação 0°	40
Tabela 5 - Resultados das soldagens das juntas sobrepostas na orientação 90°	41
Tabela 6 -Resultados das soldagens das juntas sobrepostas na orientação 30°	41
Tabela 7 - Resultados das soldagens das juntas sobrepostas com orientações negativas.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a - Garganta do cordão de solda
b - Folga entre as chapas
Aa - Área da bitola do arame
 α - Ângulo do cordão em relação a chapa inferior
 β - Ângulo do cordão em relação a chapa superior
DBCP - Distância de bico de contato-peça
GMAW - Sigla em inglês: Gas Metal ArcWelding
H - Energia de Soldagem
I - Intensidade de Corrente Elétrica
Is - Corrente de Soldagem
Im - Corrente média
L - Largura da Penetração
L1 - Largura da Penetração na Chapa Superior
L2 - Largura da Penetração na Chapa Inferior
MAG - Sigla em inglês: *Metal Active Gas*
MIG - Sigla em inglês: *Metal InertGas*
t - Espessura da Chapa
t1 - Espessura da Chapa Superior
t2 - Espessura da Chapa Inferior
U1- Mordedura na Chapa Superior
U2 - Mordedura na Chapa Inferior
V - Volume
Va - Velocidade do arame
Vi - Velocidade Inicial
Vs - Velocidade de Soldagem
Vsm - Velocidade de Soldagem média

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
1.1.	Definição do Problema.....	14
1.2.	Objetivos.....	15
1.2.1.	Objetivo Principal.....	15
1.2.2.	Objetivos Específicos.....	16
1.3.	Justificativa.....	16
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1.	O Processo GMAW de União.....	19
2.2.	Principais Variáveis do Processo GMAW.....	20
2.2.1.	Tensão elétrica e Corrente de Soldagem.....	20
2.2.2.	Vazão e tipo de gás de proteção.....	23
2.2.3.	Distância de bico de contato-peça – DBCP.....	25
2.2.4.	Energia e velocidade de soldagem.....	26
2.2.5.	Ângulo de sentido de soldagem e de ataque.....	27
3.	MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA.....	29
3.1.	Materiais.....	29
3.2.	Equipamentos.....	30
3.3.	Metodologia.....	31
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
6.	REFERÊNCIAS.....	47

1. INTRODUÇÃO

As soldas nos tempos anteriores a década de 1880 eram executadas somente na forja do ferreiro. Entretanto, com o advento da Primeira e Segunda Guerra Mundial e o crescimento da industrialização fez com que a soldagem se desenvolvesse rapidamente.

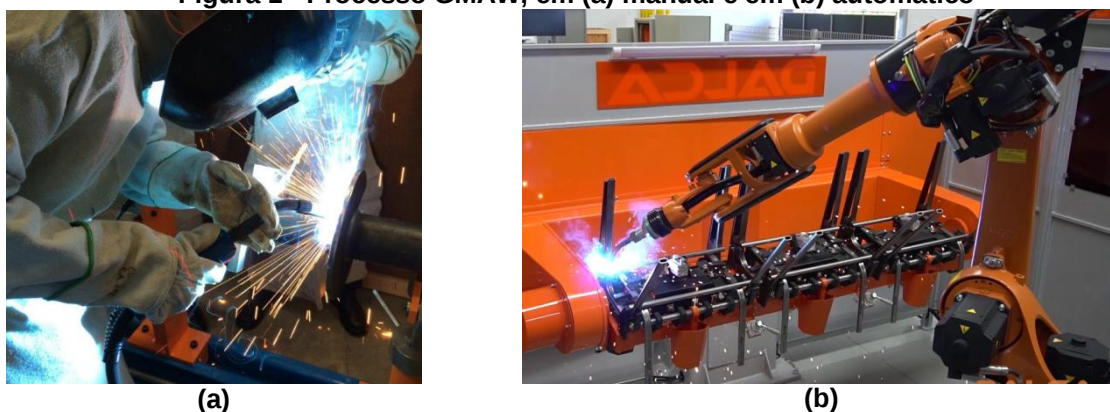
A primeira soldagem a arco foi realizada pelo russo Nikolai Bernardos em 1880, no qual conseguiu gerar um arco elétrico entre um eletrodo de carvão e as peças a serem unidas. Uma vareta de metal de adição era inserida no arco elétrico para alimentar a poça de fusão. Em 1890, esse invento patenteado ganhou uma versão com eletrodo de metal que tinha as duas funções de eletrodo e de material de adição. A partir disso, vieram vários modelos de soldagem, até chegar o desenvolvimento do processo GMAW (*Gas Metal ArcWelding*). Primeiramente no ano de 1930, com o desenvolvimento da soldagem MIG feito por H. M. Hobart e P.K. Denver usando os gases Hélio e Argônio e em 1953 com a soldagem MAG realizada por Lyubavskii e Novoshilo, que na época utilizaram o gás de dióxido de carbono (CO₂). (ESAB, 2005).

O processo GMAW, por sua vez, tem vantagens como: flexibilidade da soldagem ser realizada em todas as posições, penetração de raiz mais uniforme, alimentação constante do material de adição, execução da soldagem sem dificuldades e pode facilmente ser automatizado. Porém, há algumas desvantagens como: respingos e salpicos de metal líquido na execução da soldagem; maior suscetibilidade à variação de parâmetros elétricos do arco, que consequentemente influem na qualidade do cordão de solda e o equipamento é mais caro e menos portátil que o eletrodo revestido.

O processo GMAW pode ser executado manualmente, pela própria mão do soldador, ou de forma mecanizada ou automática, onde a condução da tocha de soldagem é feita por um manipulador ou um robô. A soldagem automática é mais benéfica do que manual, que por sua vez, faz com que o soldador esteja exposto aos raios ultravioleta que podem ocasionar doenças como: câncer de pele, fotoenvelhecimento, fotoqueratite, eritema cutâneo e catarata. Além de estar exposto aos fumos gerados pela soldagem que podem gerar problemas respiratórios. (SOUSA e BARRA, 2012).

A soldagem automática é mais produtiva do que a manual, devido à capacidade do robô de conduzir a tocha de soldagem com maior velocidade do que o soldador além, de operar o dia inteiro sem pausa. Em relação às irregularidades geométricas das juntas, a soldagem manual a princípio leva vantagem, pois, o soldador ainda é a solução mais barata para a correção de trajetória. Atualmente, a correção de trajetória em robôs é feita com sensores lasers ou do próprio arco, caracterizando a área de conhecimento chamada de automação da soldagem.

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



Fonte: (a) WELD (2019) e (b) DALCA (2018)

Assim dessa forma, constata-se que a soldagem automática é a mais desejada pelas empresas em função da maior produção, desde que se obtenha um procedimento de soldagem robusto para não perder em qualidade.

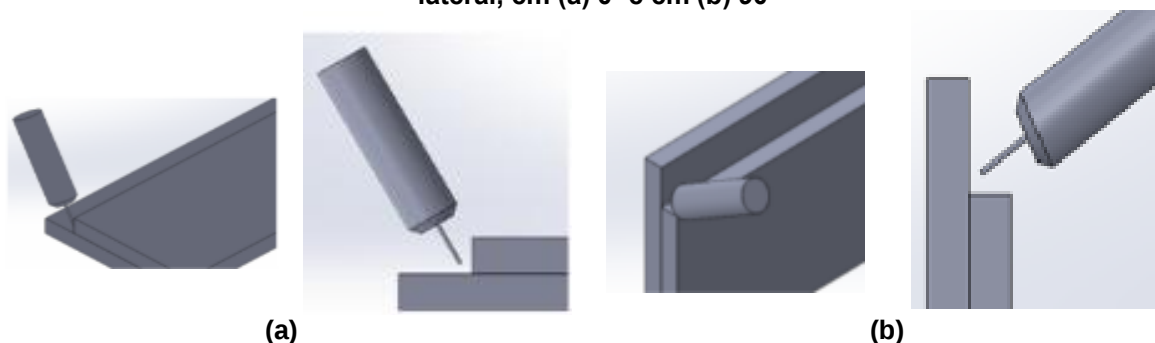
Esta monografia está sintonizada com o que as empresas de fabricação esperam de solução para o incremento de produtividade e competitividade. Pois, se utiliza a máxima velocidade de soldagem com o robô, a princípio para juntas sobrepostas. Espera-se que futuramente este trabalho seja implementado nas empresas que optem pela soldagem automática para aumento de produção e lucratividade.

1.1. Definição do Problema

Independente da forma, manual ou automática, as juntas sobrepostas são soldadas pelo processo GMAW de forma manual ou automática na posição de soldagem horizontal e com orientação em 0° da junta, caso em que a sua menor aresta está na vertical, Figura 2a. Entretanto, algumas indústrias de fabricação preferem manter a posição horizontal de soldagem com a orientação de 90° da

junta, Figura 2b, principalmente na soldagem simultânea de duas juntas sobrepostas localizadas em lados opostos da peça.

Figura 2 – Principais orientações das juntas sobrepostas em perspectiva isométrica e vista lateral, em (a) 0° e em (b) 90°



Fonte: Elaboração Própria (2019)

O problema é que não se sabe qual destes procedimentos de soldagem é o mais produtivo ou, se há outro mais produtivo. Portanto, a determinação do procedimento de soldagem GMAW que proporcione a maior produção automática com qualidade de juntas sobrepostas é o foco deste trabalho.

Com base nas observações referentes à fabricação de peças, a presente monografia delimita-se fundamentalmente em encontrar as respostas para as seguintes questões:

- Qual das duas orientações da junta sobreposta, 0° ou 90°, proporciona maior produtividade?
- Há outra orientação da peça e/ou posição de soldagem que resulte em maior produção?

1.2. Objetivos

Diante das questões de indefinição de produção das soldas em juntas sobrepostas supracitadas, o presente trabalho de conclusão de curso tem os objetivos citados a seguir.

1.2.1. Objetivo Principal

Determinar a orientação da junta sobreposta, posição de soldagem e todos os outros parâmetros do respectivo procedimento GMAW que proporcione maior produção de uniões com base nos critérios de qualidade das normas ISO.

1.2.2. Objetivos Específicos

Para cumprir plenamente com o objetivo principal desta monografia, será necessário realizar todos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar o funcionamento da célula de soldagem dos corpos de prova, composta por um robô antropomórfico de soldagem, uma tocha GMAW, uma fonte de soldagem, um sistema automático de alimentação de arame, um sistema de refrigeração da tocha e uma mesa basculante com dispositivo de fixação dos corpos de prova;

- Preparar os corpos de prova e as respectivas juntas de sobrepor a partir do corte de chapas planas de aço 1020 em máquina guilhotina;

- Determinar a área da junta de sobrepor e a relação entre as velocidades de arame e de soldagem para depositar sempre a mesma quantidade de material de adição desde a velocidade de soldagem de 0,6 m/min. até 1,3 m/min.;

- Programar, tanto o robô, quanto a fonte de soldagem para a produção das uniões nos corpos de prova, começando pela orientação da junta de 0° - Figura 2a, depois pela orientação da junta de 90° - Figura 2b e, finalizando, por outras orientações e posições de soldagem;

- Cortar os corpos de prova em máquina CNC de eletroerosão a fio para a produção das macrografias;

- Construir um mini *Studio* fotográfico para a obtenção das macrografias das juntas de sobrepor soldadas;

- Utilizar programa CAD SolidWorks para determinar o valor dos parâmetros geométricos de cada junta de sobrepor soldada;

- Aprovar ou reprovar cada junta de sobrepor soldada com base nos critérios das Normas ISO.

1.3. Justificativa

Atualmente, não há padronização quanto à orientação da junta sobreposta para a soldagem com o processo GMAW. Cada empresa realiza o

procedimento de soldagem com a orientação da junta que acha melhor. Muitas através da experiência profissional, porém, sem nenhuma experimentação científica, com geração e análise de dados. Neste sentido, as respostas das questões supracitadas justificam essa monografia por direcionar empresas do setor de fabricação em usar a correta orientação da junta sobreposta e o seu respectivo procedimento GMAW com uma maior velocidade de soldagem.

Uma das relevâncias deste trabalho é o incremento da competitividade das empresas que aplicarem o procedimento de soldagem desenvolvido. Outra importante relevância é a capacitação do autor desta monografia em aprimorar procedimentos de soldagem.

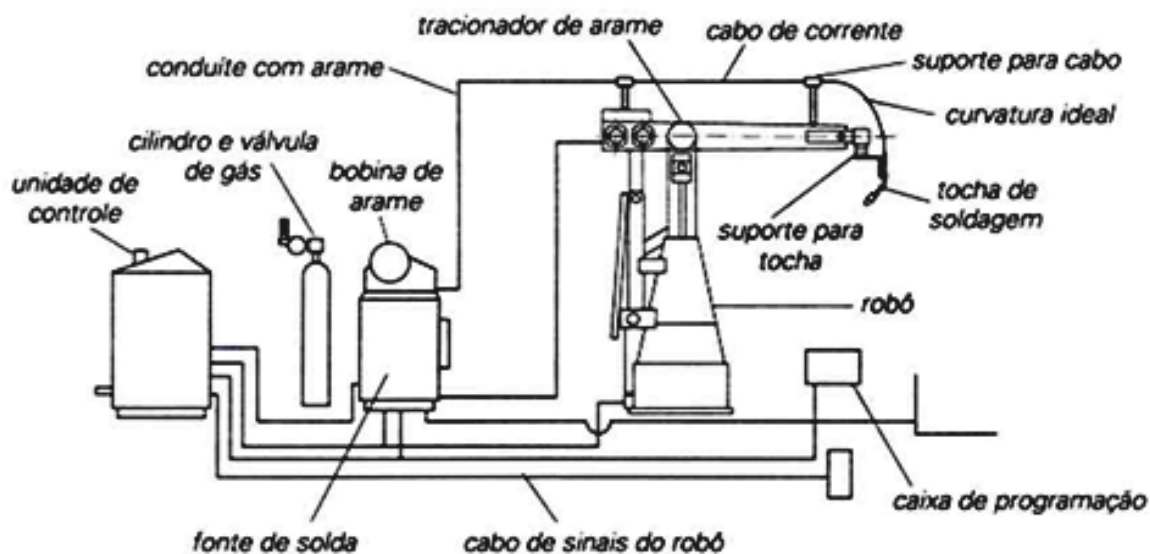
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O processo GMAW possui características intrínsecas que o fazem ser escolhido pelas indústrias para a automatização da fabricação de peças e também para a manutenção. As mais importantes são:

- Alimentação contínua do material de adição, o que não precisa parar a cada momento para inserir arame. Assim, o processo tem uma rentabilidade maior, uma vez que não há restrição do comprimento da solda;
- Flexibilidade da soldagem de ser realizada em todas as posições, como: plana, horizontal, vertical e sobre-cabeça;
- Taxa de deposição elevada, ou seja, deposita mais material na junta;
- Não gera escória;
- Não tem desperdício de material, ao contrário de outros processos onde as pontas dos eletrodos consumíveis são perdidas;
- O processo é mais rápido, o tempo total de execução de solda é cerca de metade que no de eletrodo revestido.(WAINER, BRANDI e MELLO, 1992).

Todas essas características promovem uma alta produtividade, que tornam o GMAW, o processo mais utilizado nas indústrias, como o da Figura 3, atualmente.

Figura 3 - Principais componentes de uma célula de fabricação GMAW



Fonte: INFOSOLDA (2019)

2.1. O Processo GMAW de União

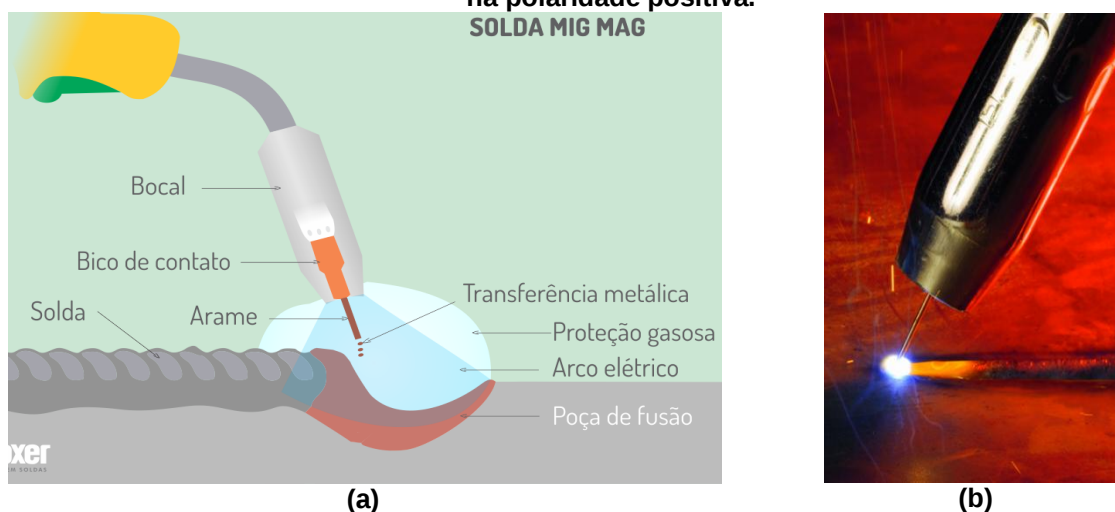
O processo GMAW ou também conhecido no Brasil como MIG/MAG (Metal InertGas/Metal Active Gas), ocorre quando se estabelece um arco elétrico entre o eletrodo consumível (Arame) e a peça que irá a ser soldada, de forma que arco elétrico gera um aquecimento para produzir a união de peças metálicas. Esse arco elétrico e a região de solda são protegidos por um gás que evita a contaminação da atmosfera, Figura 4. Esse gás pode ser um gás ativo ou inerte. (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

O processo em que se utiliza o gás inerte (MIG) que é um gás que não exerce interação com a região da solda, é mais apropriado para alumínio e ligas de alumínio. Já o processo MAG, que usa gases ativos para interação com a região de solda, é mais utilizado para na soldagem de aços de baixo carbono e aços de alta liga. (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992).

E o processo em que se usa o gás ativo (MAG), que no caso é gás que tem interação com a região de solda, é mais utilizado para na soldagem de aços de baixo carbono e aços de alta liga. (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992).

Atualmente, o GMAW é cada vez mais usado, porque existe uma propensão da soldagem mecanizada ou semi-automática substituírem a soldagem manual, pois, foi constatado que são mais apropriados para a soldagem automática e também com o uso de robôs. (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

Figura 4 – Em (a) a representação esquemática do processo GMAW e em (b) a foto do arco na polaridade positiva.



Fonte: (a) Boxer (2019) e (b) SAF-FRO (2019)

Além das vantagens já mencionadas no início deste capítulo. Os autores Wainer, Brandi e Mello (1992) e Marques, Modenesi e Bracarense (2009), abordam em suas obras as seguintes desvantagens deste processo, tais como:

- Por não ter escória, o resfriamento da poça de fusão é rápido implicando em um menor rendimento quando comparado ao processo SAW (*Submerged Arc Welding*);

- Mais suscetível à variação de parâmetros elétricos do arco de soldagem que influem na qualidade da solda;

- Respingos e salpicos de metal líquido na execução da soldagem;

- Grande emissão de raios ultravioletas e fumos, que pode gerar problemas para a saúde do soldador, quando usado manualmente;

- O equipamento é mais caro e com maior probabilidade de entrar em manutenção, comparado ao eletrodo revestido;

- O equipamento é menos portátil em relação ao eletrodo revestido e em locais que têm difícil acesso, a operação de soldagem com este é bastante difícil.

2.2. Principais Variáveis do Processo GMAW

No processo GMAW a regulagem de seus parâmetros influenciam diretamente na geometria do cordão solda obtido. 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.

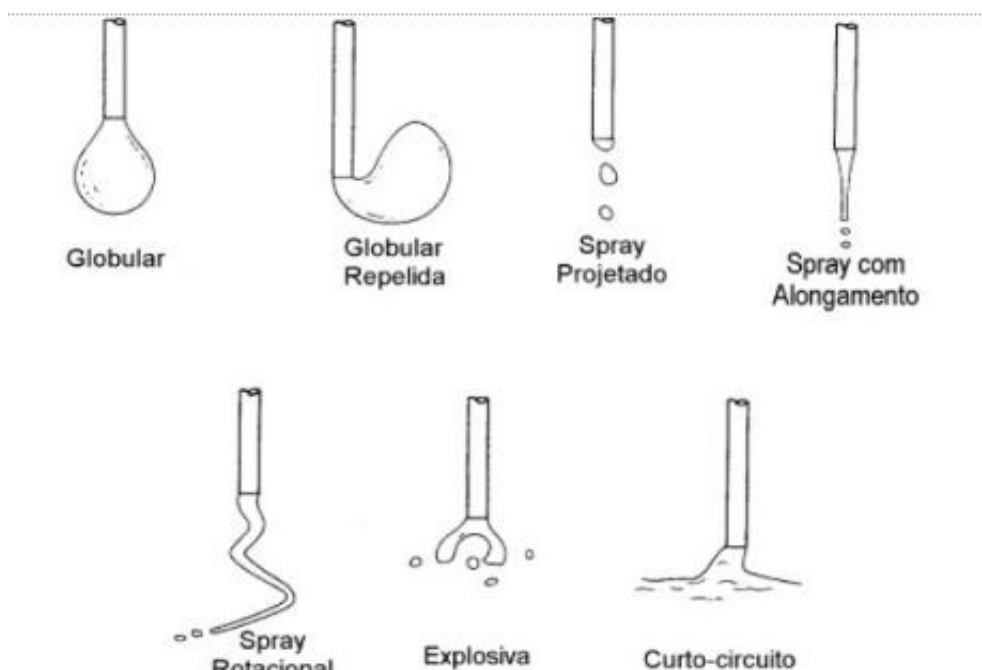
Os parâmetros mais relevantes neste processo são: tipo de gás de proteção, polaridade, tipo e intensidade de corrente, tensão elétrica, DBCP e a velocidade de soldagem. (IBRAHIM et al., 2012).

2.2.1. Tensão elétrica e Corrente de Soldagem

A maior interferência na penetração, taxa de consumo, energia específica e no modo de transferência (juntamente com a tensão) está no parâmetro de corrente elétrica do arco. Por exemplo, se o processo de soldagem tiver um aumento de tensão e a corrente elétrica ultrapassarem o valor de

transição do arame, o modo de transferência metálica é alterado do curto-circuito para o *spray*. (MACHADO, 1996). Na Figura 5, observam-se os tipos de transferências metálicas com mudanças desses parâmetros.

Figura 5 - Tipos de Transferências Metálicas

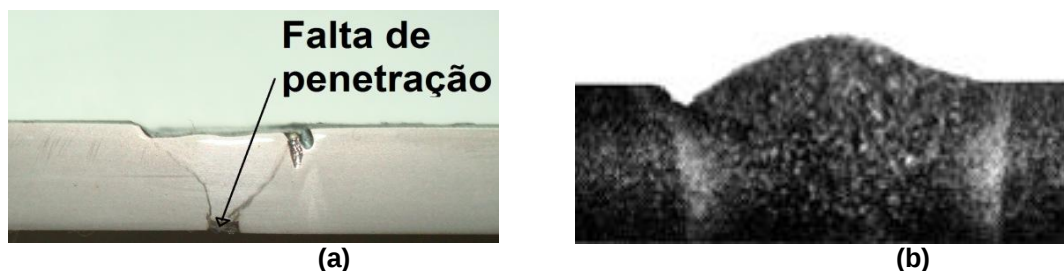


Fonte: Silveira (2018)

Ressaltando que o modo *spray* possibilita grandes taxas de deposição de material de adição, o que o torna recomendável utilizá-lo sempre que for viável. (INFOSOLDA,1997).

A tensão do arco influencia no modo de transferência, de modo que uma baixa tensão combinada com uma baixa velocidade de alimentação resulta em modo de transferência de curto-circuito, e quando combinada com uma maior velocidade de alimentação modo de transferência é globular. Além disso, a tensão pode aumentar a largura, diminuir a altura e a penetração do cordão de solda, uma vez mantidos os outros parâmetros constantes. (MODENESI, 2005). Na Figura 6a, notam-se os problemas com falta de penetração que podem decorrer de um aumento de tensão ou uma baixa corrente e a Figura 6b, mostram mordeduras que podem surgir devido à maior tensão do arco elétrico.

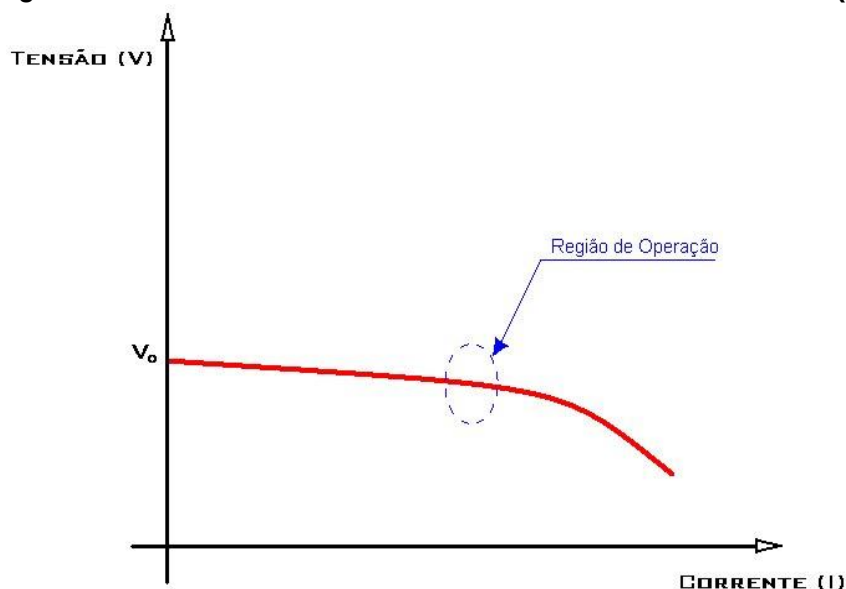
Figura 6 - (a) Cordão de Solda com falta de penetração e (b) Cordão de Solda com mordedura



Fonte: Jacob (2017)

O processo GMAW pode ser com fonte de tensão ou fonte de corrente. As fontes de tensão fornecem fundamentalmente a mesma tensão em toda a faixa de operação. Essas também possibilitam que a intensidade da corrente tenha amplas variações em reação a alterações do comprimento do arco durante o processo de soldagem. Isso proporciona o controle natural do comprimento do arco por variações da corrente de soldagem (observa-se isso na Figura 7) e também consequentemente da taxa de fusão do arame, nos processos de soldagem na qual a velocidade de alimentação é constante. A maioria das utilizadas são fontes de tensão constantes. (MODENESI,2009).

Figura 7 - Curva Característica de uma fonte de Tensão constante (CV)



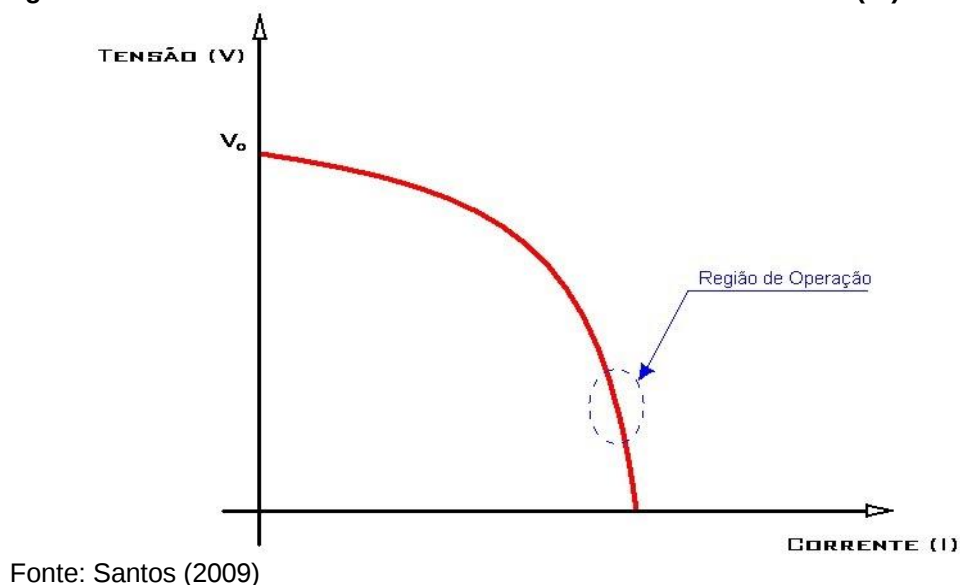
Fonte: Santos (2009)

As fontes de corrente constante possibilitam que durante a execução da soldagem, o comprimento do arco varie sem que a corrente de soldagem tenha alterações significativas. O uso de corrente maior e/ou velocidade de arame menor implica no escalonamento do arco com a fusão do bico de contato, enquanto o

decremento da corrente e/ou aumento da velocidade do arame implica na extinção do arco pelo toque do arame na poça de fusão. (NERES, 2018).

Na Figura 8, tem-se a curva das fontes de corrente constante e sua respectiva região de operação.

Figura 8 - Curva Característica de uma fonte de corrente constante (CI)



2.2.2. Vazão e tipo de gás de proteção

O objetivo principal do gás de proteção é proteger a poça de fusão e as gotas que estão sendo transferidas para a junta. Os gases de proteção são classificados em dois tipos: inertes e ativos. Os inertes são gases que não tem nenhuma interferência química, tanto sobre material de adição, quanto ao material da peça. Os gases comerciais pertencentes a esta classificação são o Argônio (Ar) e o Hélio (He). (SCOTTI e POMAREV, 2008).

O gás Argônio tem as características de proporcionar uma penetração apropriada para soldagem, produzir um excelente perfil de cordão e gerar pouca instabilidade no arco elétrico no modo de transferência *spray*. Esse gás geralmente é misturado a outros gases para soldar metais ferrosos. (ESAB,2005). Também é mais denso que os demais gases existentes e possui uma baixa condutividade térmica e um potencial de oxidação reduzido. (FILHO, BÁLSAMO e FERRARESI,2013).

O gás Hélio é utilizado quando a soldagem precisa de um aporte térmico maior para favorecer a molhabilidade de cordão, fornece aumento de penetração e velocidade de soldagem.

Entretanto, em comparação com o gás Argônio, o gás Hélio gera um arco elétrico mais instável e tem custo mais caro. Além de produzir um perfil de cordão de solda mais largo e raso, Figura 9. (ESAB,2005).

Os gases ativos, por sua vez, reagem quimicamente com os materiais da peça e do arame de forma moderada e controlada, mais usados comercialmente são o Dióxido de Carbono (CO_2) e o Oxigênio (O_2), também existem outros gases ativos, utilizados em escala menor como: Nitrogênio (N_2) e o Monóxido de Nitrogênio (NO). (SCOTTI e POMAREV, 2008).

O Dióxido de Carbono é amplamente usado para fazer a soldagem de aços. Isso é por causa da sua boa qualidade, disponibilidade, simples instalação e baixo custo. Além disso, permite maiores velocidades de soldagem e penetração mais profunda. Todavia tem desvantagens como impossibilitar o modo de transferência *spray*, tendo apenas curto-circuito e globular. Também gera muitos respingos que podem causar baixa eficiência de deposição. (ESAB,2005).

O Oxigênio, apesar de não ser usado como gás de proteção diretamente, é utilizado nas misturas com outros gases, como o argônio, e tem as principais funções como: melhoria da estabilidade do arco, diminuição da tensão superficial da gota e da poça de fusão. (SCOTTI e POMAREV,2008).

Entretanto, quando se incrementa a concentração de oxigênio na mistura, aumentam as perdas de elementos de liga, e consequentemente deterioram as propriedades mecânicas do cordão. (FILHO, BÁLSAMO e FERRARESI, 2013).



Fonte: DBC oxigênio (2019)

A vazão do gás de proteção recomendada deve estar entre 10 a 16 l/min. Valores superiores não são eficientes e nem econômicos, além de gerar turbulência que diminui a efetividade da proteção e propicia a entrada de contaminantes na poça de fusão. Valores abaixo do recomendado implicam em falta de proteção e propicia o surgimento de porosidades no cordão de solda, Figura 10. (SCOTTI e POMAREV,2008).

Figura 10 - Cordão de solda cheio de poros devido à falta de gás de proteção



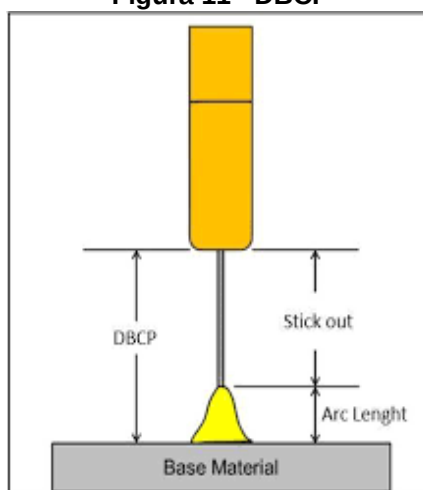
Fonte: Jacob (2017)

2.2.3. Distância de bico de contato-peça – DBCP

Outro parâmetro importante é a distância bico de contato-peça (DBCP), que como o nome já diz, é a distância entre o bico de contato na tocha até a superfície da peça a ser soldada ou o resultado da soma do comprimento do eletrodo que está energizado (*stickout*) e do comprimento do arco elétrico (*arclenght*), conforme a Figura 11. (POMAREV e SCOTTI,2008).

Quando se tem um DBCP muito grande, o arco torna-se instável, deteriorando a geometria do cordão com a diminuição da penetração e o incremento das mordeduras. (ESAB,2005).

Figura 11 - DBCP



Fonte: Castro, Pinheiro e Motta (2017)

Além disso, quando a fonte opera em tensão constante (CV) e aumenta-se o DBCP, que influencia no aumento a resistência elétrica do condutor, através da lei de Ohm, a corrente elétrica diminui. (EWI, 2015).

Entretanto, é possível aumentar DBCP para fundir uma mesma quantidade de material com uma intensidade de corrente menor. (SCOTTI e SOUZA, 2009).

2.2.4. Energia e velocidade de soldagem

A Energia de Soldagem é a energia cedida pela fonte de calor por unidade de comprimento de solda. É importante na análise dos impactos metalúrgicos da operação de soldagem sobre o material soldado e na comparação de procedimentos distintos e processo de soldagem. (MARQUES e MODENESI, 2014).

A Energia de Soldagem é obtida de forma simplificada como o produto entre a tensão eficaz (V) e a corrente eficaz de soldagem (I), que resulta na potência, dividido pela velocidade de soldagem (v_s). (MACHADO, 2016).

$$H = \frac{V \cdot I}{v_s} \quad (1)$$

A velocidade de soldagem (v_s) que é a taxa contínua em que o arco elétrico da tocha é deslocado por toda a extensão da junta de solda. (INFOSOLDA, 2013). Então, se tornarmos a tensão e a corrente como parâmetros

fixos, e aumentarmos a velocidade de soldagem, segundo a Equação 1, haverá diminuição da energia de soldagem (H) fornecida para a peça. As consequências são: cordões de solda estreitos, convexos, bordas irregulares e pouca penetração.

Em contrapartida, quando a velocidade de soldagem é pequena, tem-se mais energia de soldagem (H) conduzida na peça, e também cordões com maior molhabilidade e área fundida, e com formato do cordão mais largo. (MACHADO, 1996).

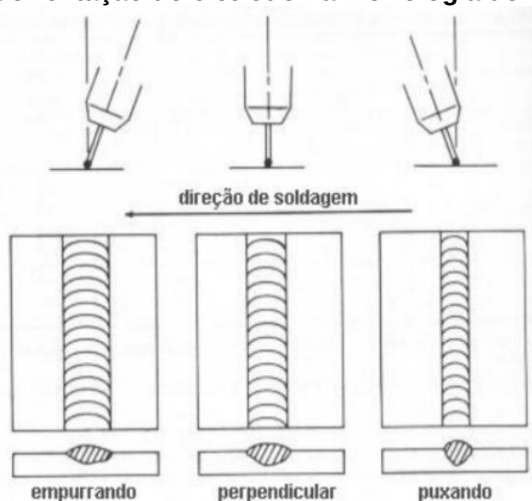
Entretanto, no momento em se tem uma velocidade de soldagem muito pequena, também se tem um maior custo de operação e pode ocorrer alterações na microestrutura do material, por causa da concentração térmica. (INFOSOLDA, 2013).

2.2.5. Ângulo de sentido de soldagem e de ataque

A orientação da tocha em relação à direção de avanço pode influenciar fortemente na geometria do cordão. (MORGANTI, 2013).

Se o ângulo de ataque estiver orientação empurrando, ou seja, no mesmo sentido de soldagem, o cordão tenderá a ser mais largo e menos convexo e com menor penetração. Em compensação, se o ângulo de ataque estiver orientação puxando, ou seja, no sentido contrário ao sentido de soldagem, cordão tenderá a ser mais estreito e convexo e com maior penetração. E a orientação perpendicular tende a ter características intermediárias entre as primeiras orientações, conforme são mostrados na Figura 12. (QUITES, 2008)

Figura 12 - Efeito da orientação do eletrodo na morfologia do cordão de solda



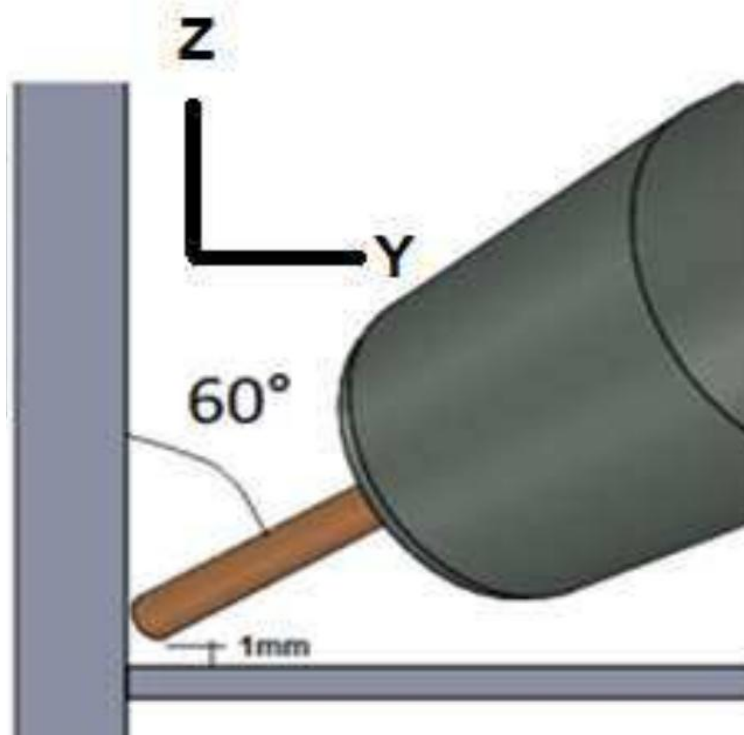
Fonte: Morganti (2013)

Isso foi também reforçado pelo estudo de Resende e Scotti (2015) que consistiram pela experimentação de quanto a geometria do cordão de solda no processo Plasma – MIG é influenciada pelos ângulos de ataque.

O ângulo de sentido de soldagem, também chamado de ângulo de trabalho, é a orientação da tocha em relação ao eixo vertical do plano transversal da junta de solda e modifica de acordo com cada posição de soldagem e tipo de junta. (MILLER, 2019).

O ângulo de sentido de soldagem pode ser 0° quando uma solda de topo plana é feita. O ângulo de soldagem usado para uma solda de filete em junta “T” pode ser de 45° para qualquer um dos dois lados, distribuindo a mesma energia para os dois componentes da peça. Entretanto, se os componentes têm espessuras diferentes, a tocha deve estar mais direcionada para o componente mais espesso, Figura 13. (THOMAS e JUND, 2014).

Figura 13 - Ângulo de sentido de soldagem



Fonte: Machado (2016)

3. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA

3.1. Materiais

Os materiais necessários para a realização do experimento foram os corpos de prova, o arame e o gás de proteção.

Os corpos de prova foram feitos de chapa de aço ASTM A36, conforme composição química apresentada na Tabela 1, com 3,75 mm de espessura, 80 mm de largura e 200 mm de comprimento. Cada par de chapas foram dispostas de modo que se sobreponha 60mm outra, formando duas juntas sobrepostas por corpo de prova, como se pode observar na Figura 14.

Figura 14 - O corpo de prova



Fonte: Elaboração Própria (2019)

O arame AWS ER70S-6 de 1,0 mm de diâmetro foi o material de adição usado para produzir os cordões de solda nos corpos de prova, conforme composição química apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do material de base e de adição em valores percentuais.

MATERIAIS	C	Si	Mn	P	S	Cu
ASTM A36	≤ 0,25	≤ 0,40	0,80 – 1,20	≤ 0,04	≤ 0,05	≥ 0,20
AWS ER70S-6	0,06 - 0,15	0,80 – 1,15	1,40 – 1,85	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,50

Fonte: Uller (2017)

O gás de proteção utilizado para a soldagem dos corpos de prova foi a mistura binária de Argônio com 2% de Oxigênio com vazão de 15 l/min. Este gás

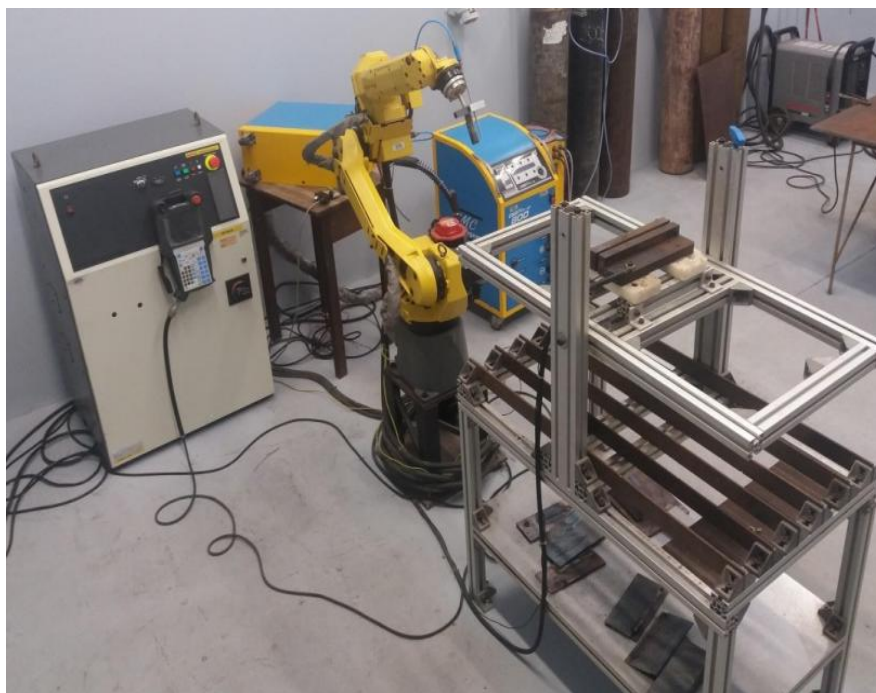
foi escolhido por possibilitar a transferência metálica por *spray* a partir da corrente elétrica de transição do arame selecionado, próximo dos 180 A.

3.2. Equipamentos

Os equipamentos principais utilizados para a realização dos experimentos de soldagem dos corpos de prova foram: o robô antropomórfico de uso didático M-10iA do fabricante Fanuc, a fonte de soldagem multiprocessoDIGIplus A7 da empresa IMC e a patenteada plataforma de posicionamento para corte e soldagem de metais do IFSC, conforme mostra a Figura 15.

Essa plataforma possui uma mesa plana acima das barras chatas de sacrifício para o corte de materiais metálicos e uma mesa plana de soldagem do tipo basculante com posicionamento angular total, 0 a 360°. Dessa maneira, a mesa basculante permite fixar peças metálicas para executar uniões ou revestimentos em qualquer posição de soldagem: plana, horizontal, vertical ascendente, vertical descendente e sobre cabeça.

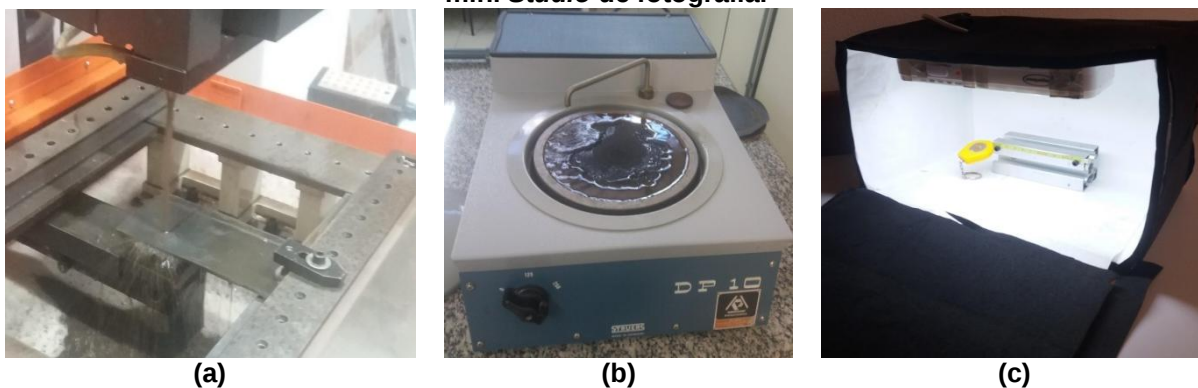
Figura 15 - Célula robotizada de soldagem



Fonte: Elaboração Própria (2019)

Os outros equipamentos, como a máquina de eletroerosão a fio, a lixadeira metalográfica e o mini *Studio*, como mostra a Figura 16, foram utilizados para a obtenção das macrografias das secções transversais dos cordões de soldas das juntas sobrepostas.

Figura 16 – Em (a) a máquina de eletroerosão a fio, (b) a lixadeira metalográfica e em (c) o mini *Studio* de fotografia.



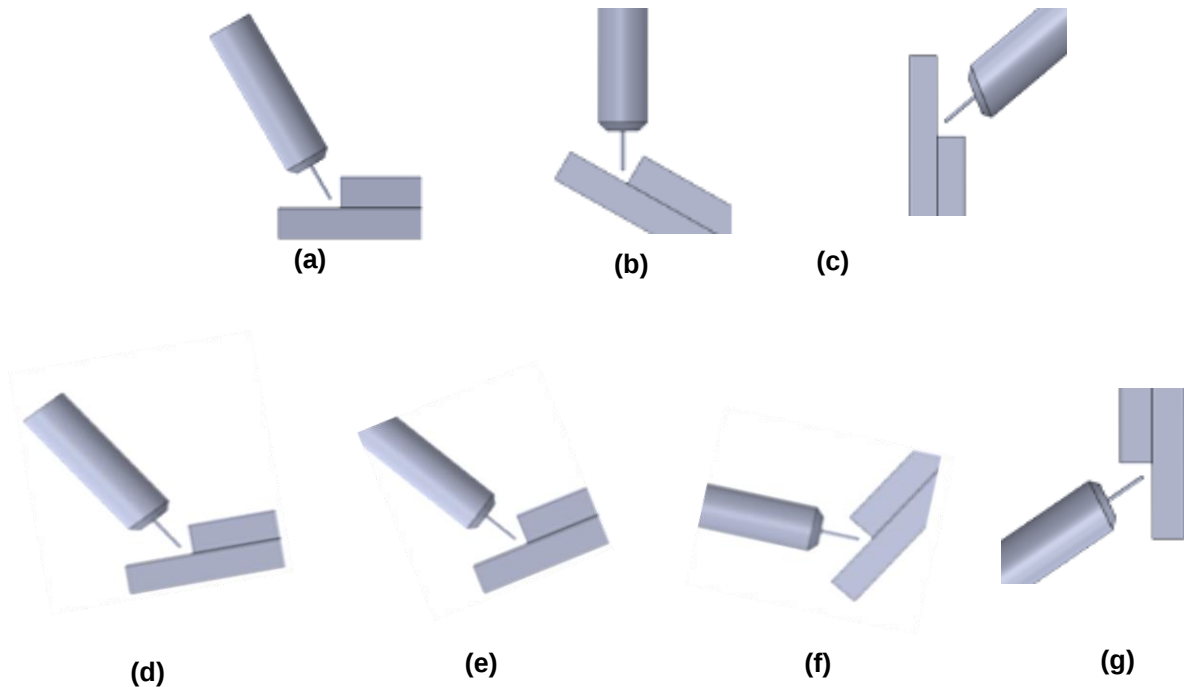
Fonte: Elaboração Própria (2019)

O mini *Studio* da Figura 16c é um simples aparato desenvolvido durante este TCC com o objetivo de utilizar de forma correta a iluminação sobre as amostras dos corpos de prova para produzir macrografias de boa qualidade. Além disso, um suporte com uma escala em milímetros em sua parte superior é utilizado para apoiar as amostras e incluir nas macrografias essa escala.

3.3. Metodologia

Todas as juntas soldadas são do tipo sobrepostas, formada por componentes estruturais de mesma espessura, conforme mostra a Figura 14. Em cada corpo de prova há duas juntas sobrepostas onde foram realizados os respectivos cordões de solda com 160 mm de comprimento, respeitando 20 mm de comprimento sem solda em ambas as extremidades dos corpos de prova. Os corpos de prova foram soldados em diversas orientações (0° , 30° , 90° , -10° , -20° , -45° e -90°) mostrados na Figura 17. A fonte de soldagem, Figura 15, foi configurada para o processo GMAW em modo corrente contínua normal e na polaridade positiva.

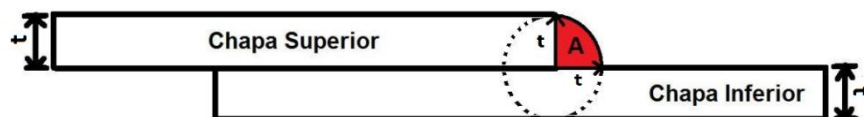
Figura 17- Ângulos de orientação da junta sobreposta do corpo de prova e do sentido de soldagem da tocha: (a) 0° e 30°, (b) 30° e 0°, (c) 90° e 60°, (d) -10° e 40°, (e) -20° e 50°, (f) -45° e 75°, (g) -90° e 120°



Fonte: Elaboração Própria (2019)

A velocidade de soldagem inferior selecionada para os ensaios foi a de 0,6 m/min. por ser superior à velocidade de soldagem típica de soldadores experientes para este tipo de junta, 0,5 m/min. Para fazer a programação da velocidade do arame foi considerado o perfil do cordão de solda como o formato de um quarto de circunferência com raio de mesma espessura t das chapas, como mostra a Figura 18.

Figura 18 – Formato do preenchimento da junta



Fonte: Elaboração Própria (2019)

A área de preenchimento é calculada pela Equação 2:

$$A = \frac{\pi t^2}{4} \Rightarrow A = 11,04 \text{ mm}^2 \quad (2)$$

Considerando, um percurso com velocidade de soldagem v_s de 500 mm/min., para assim, determinar o volume de material V que será depositada por minuto.

$$V = A \cdot v_s \Rightarrow V = 5.522,33 \frac{mm^3}{min} \quad (3)$$

Considerando, o diâmetro do material de adição de 1 mm, sua área A_a é de cerca de $0,79 \text{ mm}^2$. A velocidade de arame v_a para preencher o respectivo volume V da junta é dada pela Equação (4):

$$v_a = \frac{V}{A_a} \Rightarrow v_a = 6,99 \frac{m}{min} \quad (4)$$

Assim sabendo a velocidade do arame v_a e a de soldagem usada inicialmente ($v_s = 0,5 \text{ m/min.}$), é possível definir o coeficiente K que é responsável pela relação entre essas duas velocidades.

$$K = \frac{v_a}{v_s} \Rightarrow K = 13,98 \quad (5)$$

Então, para programar a velocidade do arame v_a da fonte, basta multiplicar a velocidade de soldagem v_s desejada pela constante k . Como a velocidade limite do alimentador de arame da fonte de soldagem é de 20 m/min., a velocidade de soldagem máxima é de cerca de 1,4 m/min.

Na sequência, para programar a corrente elétrica $I = f(v_a)$ da fonte, basta utilizar a Equação 6 obtida pelo pesquisador BONACORSO(2017) para uma distância bico de contato peça de 20 mm:

$$I = f(v_a) = 12 \cdot v_a + 76 \quad (6)$$

As soldas foram executadas com velocidades de soldagem na faixa de 0,6 m/min. até 1,3 m/min. com ângulo de ataque nulo. A Tabela 2 mostra as velocidades de soldagem utilizadas com as respectivas velocidades de arame e corrente elétrica.

Tabela 2– Parâmetros usados para programação do robô industrial e a fonte de soldagem

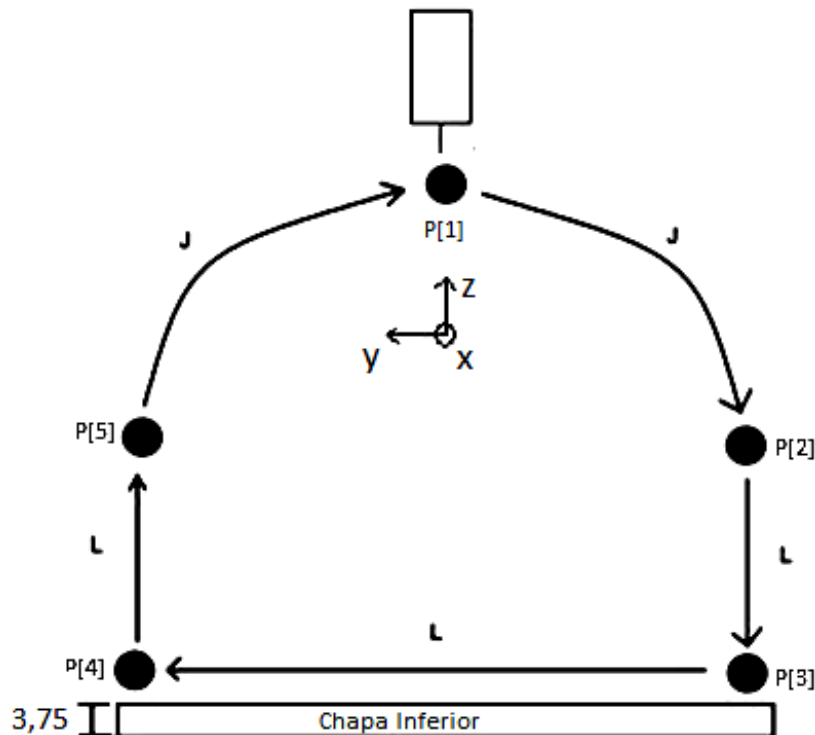
Parâmetros de velocidade do arame e da corrente em função da velocidade de soldagem								
vs(m/min.)	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
va(m/min.)	8,4	9,8	11,2	12,6	14	15,4	16,8	18,2
I (A)	177	194	210	227	244	261	277	294

Fonte: Elaboração Própria (2019)

Com a junta fixada na mesa de soldagem e corretamente orientada, o programa do robô foi elaborado com base no croqui da Figura 19. A programação foi a *on-line* com a gravação de *targets*, que são as posições do TCP (*tool center point*) mais as respectivas orientações da tocha GMAW. Para a programação da trajetória de soldagem foram gravados cinco *targets*, P[1] a P[5]:

- P[1] é o *target* onde a tocha está afastada do corpo de prova;
- P[2] é o *target* de aproximação do início do cordão de solda;
- P[3] é o *target* do início do cordão de solda;
- P[4] é o *target* do fim do cordão de solda;
- P[5] é o *target* de afastamento do final do cordão de solda.

Figura 19 – Croqui da trajetória de soldagem das juntas sobrepostas



Fonte: Elaboração Própria (2019)

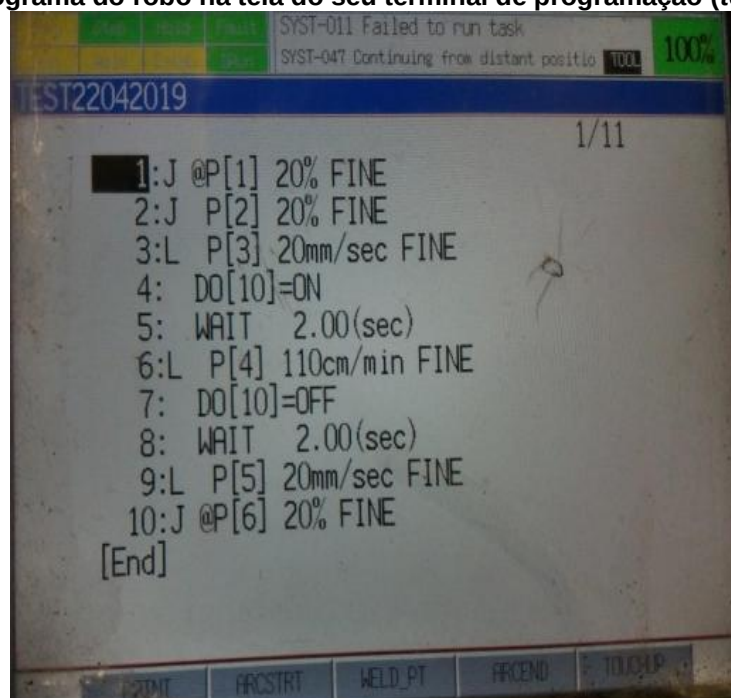
O programa do robô da Figura 20 possui dez linhas e seis *targets* onde

o último P[6] é idêntico ao primeiro P[1]. Ao executar o programa, o TCP da tocha que está no *target* P[1] se desloca rapidamente por juntas (J) até o *target* P[2] de aproximação do início do cordão de solda.

Na sequência o robô desloca linearmente (L) o TCP da tocha para o início do cordão de solda (*target* P[3]), liga a fonte de soldagem via o sinal DO[10] e espera por 2 segundos referente a formação da proteção gasosa (pré-gás). No final deste período o arco elétrico e o material de adição são fornecidos pela fonte de soldagem para a formação do cordão de solda e o robô desloca linearmente (L), com a velocidade de soldagem programada (1,1 m/min.), o TCP da tocha para o *target* P[4].

Ao atingir o *target* P[4], o robô desliga a fonte de soldagem que interrompe o material de adição, o arco elétrico e prolonga o fornecimento de gás por 2 segundos para proteger a poça de fusão da contaminação da atmosfera (pós-gás). No final deste período o robô afasta o TCP da tocha para o *target* P[5] e depois retorna ao *target* P[1].

Figura 20 – O Programa do robô na tela do seu terminal de programação (*teach pendant*)



Fonte: Elaboração Própria (2019)

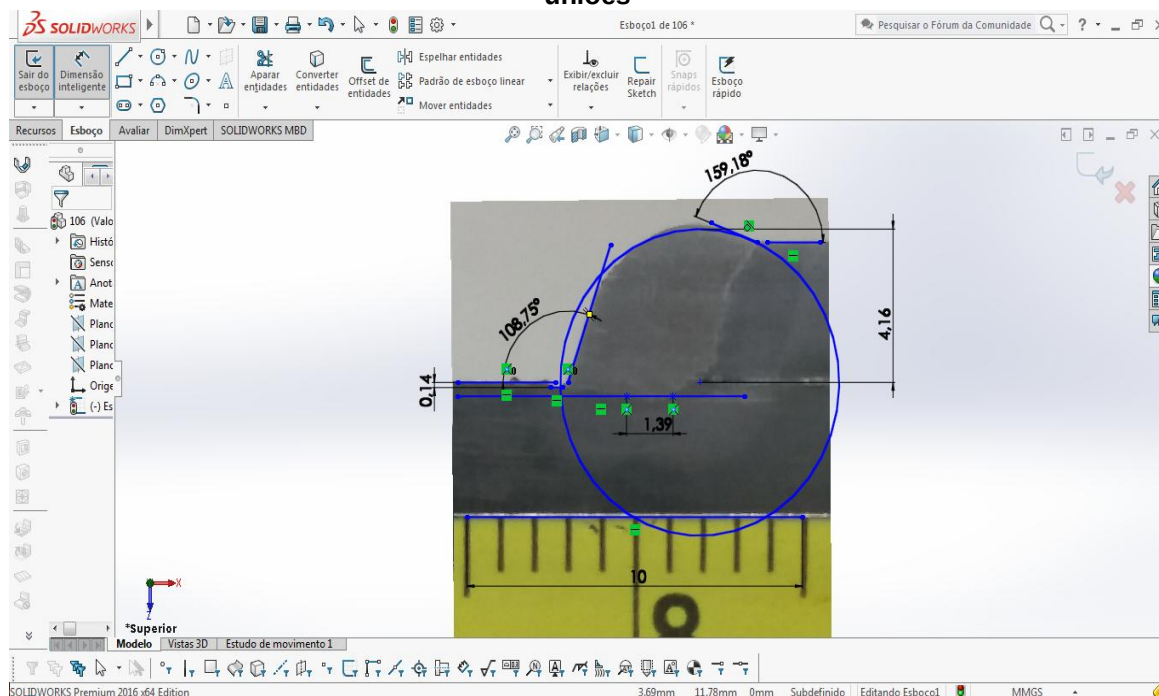
Logo após que todas as soldas estavam prontas, os corpos de prova foram cortados, no sentido transversal e a 75% dos cordões de solda, na máquina de eletroerosão a fio para ter uma superfície plana para que a análise fosse realizada,

Figura 16a. Depois de cortadas as amostras, foram feitas a preparação das superfícies, lixando a superfície com água corrente para retirar sujeira e marcas deixadas pelo corte.

Depois as superfícies foram secas na secadora, e foi colocado álcool etílico para tirar umidade da superfície, logo após foi realizado o ataque químico nas amostras com iodo para que as geometrias dos cordões de solda fossem “reveladas”. Após foram feitas as macrografias das uniões no miniStudio desenvolvido.

Na sequência, as referidas macrografias foram importadas para o programa CAD SolidWorks, Figura 21, para a medição dos parâmetros geométricos referentes aos critérios de qualidade de união das juntas sobrepostas.

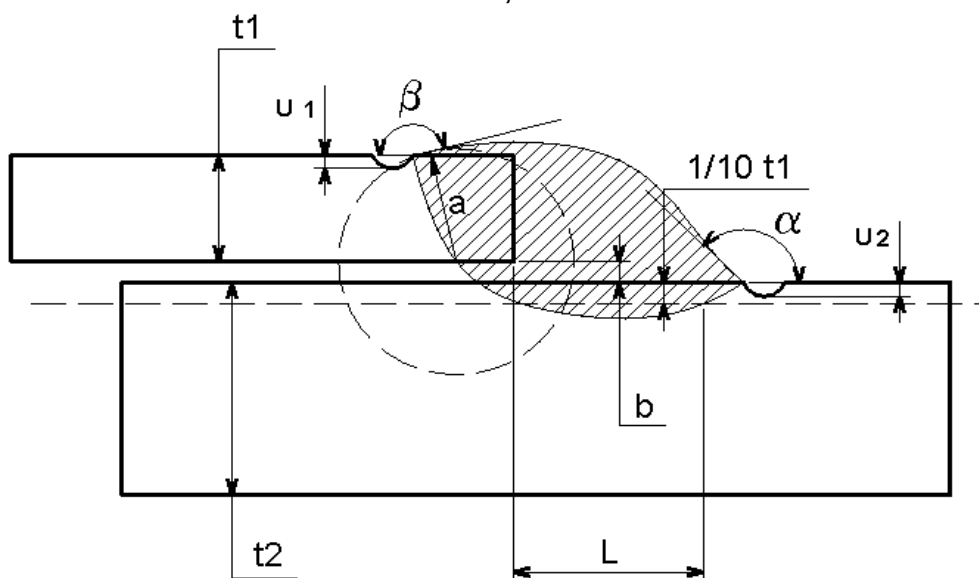
Figura 21 – O programa CAD Solidworks para a medição dos parâmetros geométricos das uniões



Fonte: Elaboração Própria (2019)

A obtenção do valor da velocidade de soldagem máxima para uma determinada orientação da junta sobreposta está vinculada a aparência visual adequada do cordão de solda e aos sete parâmetros dimensionais referentes à secção transversal, Figura 22, com seus respectivos critérios de qualidade, Tabela 3, baseados nas normas ISO de soldagem.

Figura 22 - Parâmetros relacionados nas normas ISO com base na espessura da chapa mais fina, t_1



Fonte: Auto Chassis International (2013)

Tabela 3 - Valores admissíveis aplicados aos critérios de qualidade da solda de união para espessuras: $t=t_1=t_2= 3,75$ mm

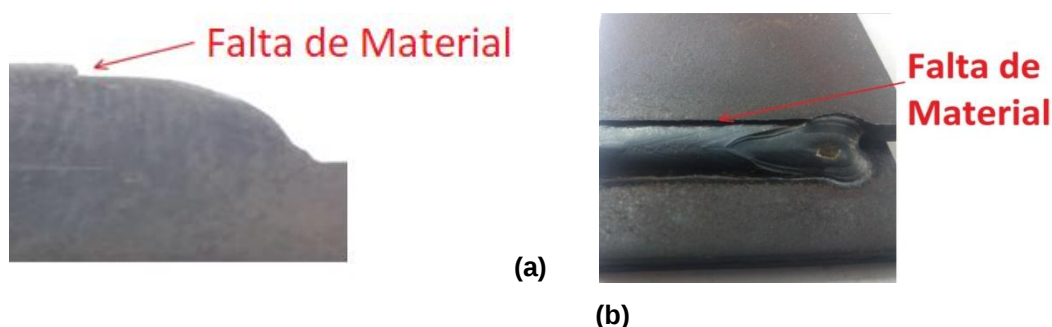
Parâmetros	Critérios de Qualidade e Faixas toleráveis
Comprimento da penetração(mm)	$L > 0,8.t \rightarrow L > 3,00$
Garganta(mm)	$a \geq 0,8.t \rightarrow a \geq 3,00$
Mordeduras (mm)	$u_1 \leq 0,1.t_1 \rightarrow u_1 \leq 0,38$ $u_2 \leq 0,1.t_2 \rightarrow u_2 \leq 0,38$
Espaçamento (mm)	$b \leq 0,2.t \rightarrow b \leq 0,75$
Ângulos entre o cordão e a peça (°)	$\alpha \geq 110$ $\beta \geq 110$

Fonte: adaptado ISO 5817

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo começar-se-á em primeiro momento a discutir e mostrar os resultados da primeira tentativa de executar a pesquisa que inicialmente fora feito com componentes estruturais de 4,76 mm de espessura. Nesta primeira tentativa, houve um problema de falta de material de adição nos corpos de provas, Figura 23.

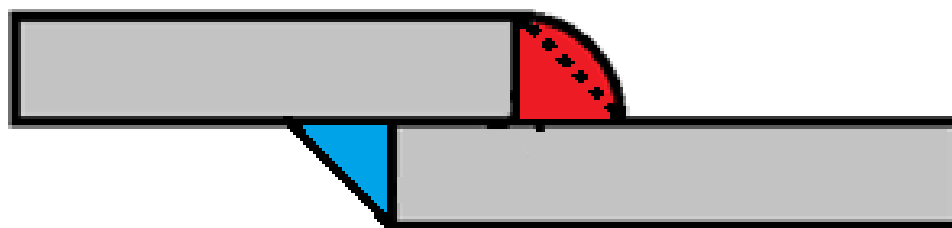
Figura 23 – Junta sobreposta soldada com falta de material de adição: (a) macrografia e (b) na foto do cordão



Fonte: Elaboração Própria (2019)

A falta de material verificada foi devido ao incorreto dimensionamento da secção transversal do cordão de solda quando considerado como um triângulo isóscele, com seus lados iguais ao da espessura dos componentes estruturais, Figura 24. Porém, observando os corpos de prova notou-se que os cordões tendiam a ficar arredondados. Então, considerou-se a área da secção transversal do cordão de solda igual a um quarto de circunferência, Figura 24, para que se aproxime da geometria do cordão de solda. Comparando as duas geometrias, a área referente a $\frac{1}{4}$ de circunferência é (57,0%) maior do que a área do triângulo isósceles.

Figura 24 – Dimensionamento da área de deposição, circular na junta superior e triangular na inferior

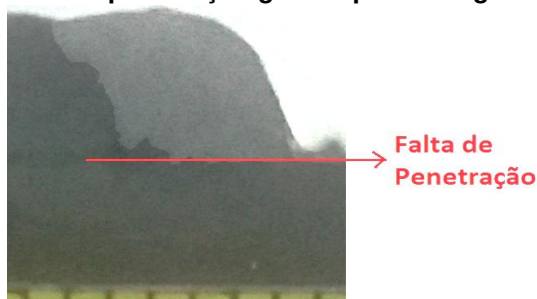


Fonte: Elaboração Própria

A espessura dos componentes estruturais foi alterada de 4,76 mm para 3,75 mm para que a transferência metálica por *spray* com DBCP de 20 mm ocorresse em toda a faixa de velocidade de soldagem usada, de 0,6 a 1,3 m/min., o que corresponde a faixa de velocidade de arame de 8,4 a 18,2 m/min.

Depois disso, foram feitos alguns experimentos e macrografias para ajuste de parâmetros com o corpo de prova na posição horizontal. Em um primeiro momento, tentou-se fazer a soldagem empurrando com 20° de ângulo de ataque. Entretanto, com base na respectiva macrografia, os componentes do corpo de prova basicamente “colaram”, sem nenhum comprimento de penetração, Figura 25. Por isso, adotou-se o ângulo de ataque nulo que mantém o comprimento da penetração dentro do limite aceitável da norma. Outra ação realizada para incrementar a penetração foi afastar a ponta do arame (TCP) em 1 mm da menor aresta da junta.

Figura 25 – Falta de penetração gerada por soldagem empurrando



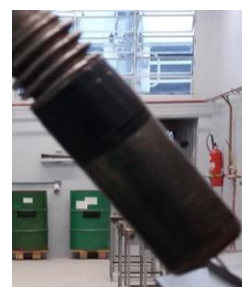
Fonte: Elaboração Própria

Além disso, foi verificado um vazamento do gás de proteção pelo encaixe do bocal da tocha, resultando porosidade nos cordões de solda, Figura 26a. Este problema foi resolvido com uma simples fita isolante cobrindo o encaixe do bocal da tocha, evitando assim, a fuga do gás de proteção, Figura 26b.

Figura 26 – Em (a) o problema de porosidade no cordão de solda e em (b) a solução utilizada



(a)

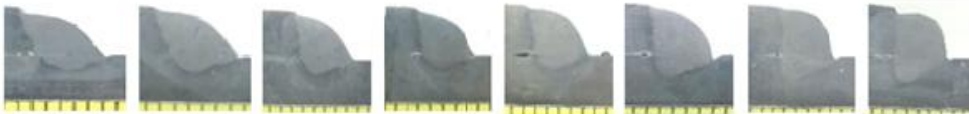


(b)

Fonte: Elaboração Própria (2019)

Após a realização desses experimentos para o ajuste correto dos parâmetros, foram realizados os ensaios para verificar a influência da orientação das juntas sobrepostas na produção das soldas de união. Inicialmente foram executadas as soldas com a orientação das juntas sobrepostas dos corpos de prova em 0° desde a velocidade de soldagem de 0,6 m/min. até 1,3 m/min. com incrementos de 0,1 m/min. Com base na análise dos parâmetros extraídos das macrografias, Tabela 4, foi concluiu-se que a velocidade de soldagem máxima alcançada e sem a reprovação da união é a de 1 m/min.. A partir de 1,1 m/min. os cordões de solda começam a reprovar pelo ângulo entre peça e solda α e por mordedura u2, Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados das soldagens das juntas sobrepostas na orientação 0°

Parâmetros e Seções Transversais	Experimentos							
	União 1	União 2	União 3	União 4	União 5	União 6	União 7	União 8
Vsm (m/min)	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
Is(A); Va(m/min)	177; 8,4	194; 9,8	210; 11,2	227; 12,6	244; 14,0	261; 15,4	277; 16,8	294; 18,2
Im(A); Vm (V)	178; 23,5	194; 23,5	209; 23,3	223; 23,5	237; 24,8	252; 27,2	268; 27,4	284; 28,8
H (kJ/cm)	4,18	3,91	3,65	3,49	3,53	3,74	3,67	3,78
Macros								
a (mm);b(mm)	3,16;0,00	3,23;0,00	3,29;0,00	3,22;0,00	3,52;0,00	3,48;0,00	3,48;0,00	3,24;0,00
L (mm)	4,34	3,92	3,77	4,13	3,47	4,74	4,93	4,39
U1; U2 (mm)	0,00;0,00	0,00;0,00	0,00;0,00	0,00;0,33	0,00;0,00	0,00;0,42	0,00; 0,24	0,00;0,21
α ; β (°)	126; 184	124; 188	123; 191	196; 185	113; 185	103; 193	101; 187	96; 177

Fonte: Elaboração Própria (2019)

Depois foram feitas as soldagens com as juntas na orientação de 90°, Tabela 5, que tiveram 0,7 m/min como a maior velocidade de soldagem aprovada. A reprovação das uniões, por ângulo entre peça e solda α e mordedura u2, começam a partir da velocidade de soldagem de 0,8 m/min.

Tabela 5 – Resultados das soldagens das juntas sobrepostas na orientação 90°

Parâmetros e seções transversais	Experimentos							
	União 1	União 2	União 3	União 4	União 5	União 6	União 7	União 8
Vsm (m/min)	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
Is(A); Va(m/min)	177; 8,4	194; 9,8	210; 11,2	227; 12,6	244; 14,0	261; 15,4	277; 16,8	294; 18,2
Im(A); Vm (V)	174; 23,5	191; 23,3	207; 23,0	220; 24,4	235; 26,5	251; 26,9	267; 27,5	283; 28,3
H (kJ/cm)	4,09	3,81	3,57	3,58	3,74	3,68	3,67	3,7
Macros								
a (mm); b(mm)	3,5; 0,00	3,67; 0,00	3,53; 0,00	3,51; 0,00	3,79; 0,00	3,40; 0,00	3,4; 0,00	3,41; 0,00
L (mm)	3,00	3,89	4,22	4,39	4,57	4,09	4,16	4,26
U1; U2 (mm)	0,00; 0,16	0,00; 0,26	0,00; 0,36	0,00; 0,41	0,00; 0,49	0,00; 0,51	0,00; 0,38	0,00; 0,38
α ; β (°)	129; 186	112; 175	109; 187	106; 185	106; 188	100; 180	92; 162	91; 158

Fonte: Elaboração Própria (2019)

Logo após, foi feito a soldagem na orientação de 30°, Tabela 6, que teve aprovação do cordão mantido até 0,9 m/min. e logo começou a reprovar com velocidades superiores por mordeduras e ângulo α insuficiente.

Tabela 6 – Resultados das soldagens das juntas sobrepostas na orientação 30°

Parâmetros e seções transversais	Experimentos							
	União 1	União 2	União 3	União 4	União 5	União 6	União 7	União 8
Vsm (m/min)	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
Is(A); Va(m/min)	177; 8,4	194; 9,8	210; 11,2	227; 12,6	244; 14,0	261; 15,4	277; 16,8	294; 18,2
Im(A); Vm (V)	177; 23,3	191; 23,8	205; 23,9	219; 25,5	236; 26,5	252; 27,7	268; 27,5	284; 27,9
H (kJ/cm)	4,12	3,9	3,67	3,72	3,75	3,81	3,69	3,66
Macros								
a (mm); b(mm)	3,18; 0,00	3,29; 0,00	3,25; 0,00	3,46; 0,00	3,36; 0,00	3,49; 0,00	3,48; 0,00	3,40; 0,00
L (mm)	3,78	4,04	4,19	3,88	4,52	4,45	4,73	4,19
U1; U2 (mm)	0,00; 0,00	0,00; 0,30	0,00; 0,21	0,00; 0,16	0,00; 0,40	0,00; 0,50	0,00; 0,29	0,00; 0,57
α ; β (°)	130; 191	124; 193	125; 189	118; 188	114; 193	110; 190	105; 179	99; 180

Fonte: Elaboração Própria (2019)

Com base nos resultados das soldagens nas três orientações da junta sobreposta, verifica-se que a orientação que resulta em maior produção é a 0° seguida pela 30° e, por último, a de 90°.

A explicação para o pior resultado da orientação 90° é devido à ação da força de gravidade que desloca a poça de fusão no sentido da menor aresta da junta, reduzindo o ângulo α entre a peça e a solda. Além disso, esse deslocamento da poça de fusão deixa desprotegido da ação do arco elétrico a maior aresta da junta, favorecendo o incremento da mordedura u2. Para a orientação 30° o efeito da força de gravidade sobre a poça de fusão é menor o que explica a obtenção de uma maior velocidade de soldagem com aprovação da soldagem do que a orientação 90°. Na orientação da junta a 0° este efeito já é favorável, tanto para o incremento do ângulo α entre a peça e solda, quanto o decremento da mordedura u2.

Seguindo a lógica de deslocamento da poça de fusão pela ação da gravidade, partiu-se para experimentos com ângulos de orientação negativas das juntas, em -10°, -20°, -45° e -90°, conforme mostra a Tabela 7. Assim, o deslocamento da poça de fusão vai favorecer tanto incremento do ângulo α entre a peça e a solda, quanto o decremento da mordedura u2. A velocidade de soldagem inicial para cada uma das orientações de junta foi a maior velocidade de soldagem dos experimentos anteriores com a solda aprovada, ou seja, 1,0 m/min. no experimento com orientação de junta nula.

Tabela 7 - Resultados das soldagens das juntas sobrepostas com orientações negativas

Parâmetros e seções transversais	Experimentos com a Orientação em -10° e Orientação de Sentido de Soldagem em 30°		Experimentos com a Orientação em -20° com o Sentido de Soldagem em 30°		Experimentos com a Orientação em -45° e Orientação de Sentido de Soldagem em 75°		Experimentos com a Orientação em -90° e Orientação de Sentido de Soldagem em 120°	
	União 1	União 2	União 1	União 2	União 1	União 2	União 1	União 2
Vsm (m/min)	1,0	1,1	1,0	1,1	1,0	1,1	1,0	1,1
Is(A); Va(m/min)	244; 14,0	261; 15,4	244; 14,0	261; 15,4	244; 14,0	261;15,4	244; 14,0	261;15,4
Im(A); Vm (V)	239; 26,7	255; 27,1	239; 26,2	255; 26,4	238; 25,8	254; 26,5	236; 26,2	252; 27,1
H (kJ/cm)	3,83	3,77	3,76	3,67	3,68	3,67	3,71	3,78
Macros								
a (mm); b(mm)	3,07;0,00	3,37;0,00	3,34;0,00	3,17;0,00	3,26;0,00	3,55;0,00	3,00;0,00	3,26;0,00
L (mm)	3,87	3,76	3,59	3,57	4,54	3,84	3,51	4,56
U1; U2 (mm)	0,00;0,00	0,00; 0,00	0,00;0,00	0,00;0,00	0,00;0,35	0,00; 0,23	0,00;0,15	0,00;0,16
α ; β (°)	117; 186	103;171	103;184	95; 177	111; 185	97; 176	106; 180	90; 174

Fonte: Elaboração Própria (2019)

Observando as tabelas, é possível verificar que a energia de soldagem teve uma variação inferior a 13 %, por causa da mudança de orientação. Com base nisso pode se afirmar que a orientação da chapa não influencia para maior molhabilidade da poça de fusão.

Inicialmente, foram feitas as soldagens dos corpos de prova com a orientação da junta em -10° e ângulo de sentido de soldagem de 30° . A união executada com a velocidade de soldagem de 1,0 m/min. foi aprovada, enquanto a junta realizada com a velocidade de soldagem de 1,1 m/min. foi reprovada por ângulo α menor que 110° . Entretanto, observou-se uma redução da mordedura em relação à junta com orientação nula para a mesma velocidade de soldagem de 1,1 m/min.

Na sequência, o ângulo de orientação da junta foi ampliado para -20° com o mesmo ângulo de sentido de soldagem do experimento anterior, 30° com o objetivo de incrementar o ângulo α entre a peça e a solda. As duas uniões executadas com velocidades de soldagem 1,0 e 1,1 m/min. foram reprovadas somente por ângulo α menor que 110° .

A seguir, o ângulo de orientação da junta foi mais uma vez ampliado para -45° e ângulo de sentido de soldagem de 75° para forçar o deslocamento da poça de fusão no sentido de incrementar o ângulo α para aprovação das soldas. A união executada com a velocidade de soldagem de 1,0 m/min. foi aprovada, enquanto a junta realizada com a velocidade de soldagem de 1,1 m/min. foi reprovada por ângulo α menor que 110° .

Por fim, o ângulo de orientação da junta foi mais uma vez ampliado para -90° e ângulo de sentido de soldagem de 120° , Figura 27a, para forçar ao máximo o deslocamento da poça de fusão para incrementar o ângulo α entre a peça e a solda. Além da reprovação das duas uniões executadas com velocidades de soldagem 1,0 e 1,1 m/min. somente por ângulo α menor que 110° , houve escorrimento da poça de fusão nos dois experimentos, Figura 27b.

Também se notou em todas as macrografias das tabelas, a tendência dos perfis dos cordões serem mais perpendiculares em relação à chapa inferior e as penetrações dos cordões serem mais concentradas à medida que a velocidade de soldagem aumenta.

Figura 27 - Em (a) Junta orientada a -90° e em (b) cordão de solda com escorrimento da poça de fusão devido a efeito da força gravitacional



(a)



(b)

Fonte: Elaboração Própria

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos através dos experimentos com ângulo de ataque nulo, constatou-se que a soldagem automática executada na junta sobreposta com orientação de 0° é 30% mais produtiva do que na orientação de 90° , respondendo assim, a primeira pergunta inicialmente formulada: qual das duas orientações da junta sobreposta, 0° ou 90° , proporciona maior produtividade? 0° .

Esse ganho de produção é devido ao incremento da velocidade de soldagem máxima de 0,7 m/min. na orientação 90° da junta para 1,0 m/min. de velocidade de soldagem máxima na orientação 0° . Esse incremento ainda se amplia para cerca de 100% quando comparada a soldagem manual da junta sobreposta na orientação nula.

Um ângulo de ataque positivo, soldagem empurrando, para maiores velocidades de soldagem na orientação nula da junta sobreposta, proporciona cordão de solda mais largo. Isso contribui para a diminuição da mordedura U_2 e para o incremento do ângulo α , entretanto, reduz a penetração da solda o que reprova a união.

Os experimentos com ângulo de ataque nulo e orientação positiva de 30° da junta sobreposta revelaram uma velocidade de soldagem máxima de 0,9 m/min. que indica uma produção na forma automática maior do que a orientação de 90° , porém, menor que a de 0° .

A ação da força de gravidade sobre a poça de fusão explica o respectivo decréscimo da mordedura U_2 e o incremento do ângulo α entre a peça e a solda, favorecendo assim a aprovação das soldas quando o ângulo de orientação da junta é reduzido, de 90° para 0° . Esse fenômeno levou a realização de mais experimentos exploratórios com ângulo de ataque nulo para os ângulos negativos de orientação da junta sobreposta: -10° , -20° , -45° e -90° .

Somente nas orientações negativas das juntas de -10° com ângulo de sentido de soldagem de 30° e de -45° com ângulo de sentido de soldagem de 75° foi possível obter uma produção idêntica à orientação nula, ou seja, as respectivas uniões aprovadas não ultrapassaram a velocidade de soldagem de 1,0 m/min. Sendo assim, a resposta para a segunda pergunta inicialmente formulada: há

outra orientação da junta e/ou posição de soldagem que resulte em maior produção? É não.

As outras orientações negativas das juntas de -20° com ângulo de sentido de soldagem de 30° e de -90° com ângulo de sentido de soldagem de 120° , tiveram suas respectivas uniões reprovadas na velocidade de soldagem de 1,0 m/min.

A metodologia desenvolvida em conjunto com a célula GMAW de fabricação poderão servir como ponto de partida para futuros trabalhos de incremento de produção na área de soldagem, como:

- Avaliar a soldagem de juntas sobrepostas com inclinação para favorecer o deslocamento da poça de fusão e, com isso, obter uniões aprovadas com a velocidade de soldagem superior a 1,0 m/min.;
- Estudo da oscilação pendular da tocha em frequência superior a 10 Hz como técnica para o aumento da produção das soldagens de união;
- Explorar a transferência metálica por *spray* rotacional que é uma oscilação natural do arame com a finalidade de incremento da produção.

6. REFERÊNCIAS

BOXER. **Solda MIG 8 motivos para utilizá-la**. 1 fotografia. Disponível em: <<https://boxersoldas.com.br/solda-mig-8-motivos/>>. Acesso em: 12 Jun. 2019

DBC. **Gases para soldagem MIG/MAG**. 1 fotografia. Disponível em: <<http://guias.oxigenio.com/gases-para-soldagem-migmag>>. Acesso em: 12 Jun. 2019

DALCA. **Célula Robotizada de Solda TH3**. 1 fotografia. Disponível em: <<https://i.ytimg.com/vi/39m4P8bsmYw/maxresdefault.jpg>>. Acesso em: 12 Jun. 2019

ESAB. **Soldagem MIG/MAG**. Tradução de Cleber Fortes e Assistência Técnica. Contagem, MG ; 2005.

_____. **ESAB 100 anos: Um século de desenvolvimento em soldagem e corte**. Tradução de Cleber Fortes e Assistência Técnica Consumíveis. 2005.

EWI. **Gas Metal ArcWeldingBasicsTravelSpeedandContacttoWorkDistance (CTWD)**. Disponível em: <<https://ewi.org/gas-metal-arc-welding-basics-travel-speed-and-contact-to-work-distance-ctwd/>>. Acesso em: 30 mai. 2019.

FERREIRA FILHO, D.; BÁLSAMO, P.S.S.; FERRARESI, V.A. Influência do Tipo de Gás de Proteção da Soldagem MIG/MAG na Qualidade do Cordão de Aço Inoxidável. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**, 4., 2007, Estância de São Pedro, RS.

IBRAHIM, I. A. et al. The Effect of Gas Metal Arc Welding (GMAW) processes on different welding parameters. **Procedia Engineering**, v. 50, Elsevier, Selangor, 2012.

INFOSOLDA. **Processo mig/mag – Parâmetros de soldagem**. Disponível em: <<https://infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/174-processo-mig-mag-parametros-desoldagem>>. Acesso em: 30 mai. 2019.

JACOB, F. **6 Defeitos comuns comuns em soldas de eletrodo revestido**. 2017. 3 fotografias. Disponível em: <<http://calculistadeaco.com.br/6-defeitos-comuns-em-soldas-de-eletrodo-revestido-e-como-evita-las/>>. Acesso em: 12 Jun. 2019

MACHADO, I. G. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre: Editado pelo autor, 1996.

MACHADO, ADRIANO A. **Uso da técnica de oscilação longitudinal da**

incremento da produção na soldagem de união de chapas de espessuras dissimilares. 2016. Dissertação (Mestrado em Mecatrônica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

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

MILLER WELD. **MIG Welding: The Basics for Mild Steel.** Disponível em: <<https://www.millerwelds.com/resources/article-library/mig-welding-the-basics-for-mild-steel>>. Acesso em: 7 jun. 2019

MORGANTI, M. P. **Estudo da Influência do Espaçamento entre chapas e do posicionamento do ataque do arame no processo robotizado de soldagem MIG/MAG de Junta sobrepostas para arame 1,2mm.** São Caetano do Sul: Escola de Engenharia Mauá. 2013.

MODENESI, P. J. **Introdução à Física do Arco Elétrico.** Belo Horizonte: UFMG, 2005.

NERES, F. P. **Estudo Sobre Fontes de Soldagem.** Sobral: IFCE. 2018.

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

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

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, vol.20 no.4, p. 501-514, out./dez. 2015.

SAF-FRO. **Procedimento disaldatura-mig/mag.** 1 fotografia, color. Disponível em: <<https://www.saf-fro.com/it/processi/procedimento-di-saldatura-mig-mag>>. Acesso em: 12 Jun. 2019.

SILVEIRA, J. **Estudo do Arco Elétrico.** 2018.1 fotografia. Disponível em: <[http://docente.ifsc.edu.br/julio.silveira/MaterialDidatico/Soldagem%20\(Eletro%20II\)/01%20-%20Introdu%C3%A7%C3%A3o/Estudo%20do%20Arco%20El%C3%A9trico.pdf](http://docente.ifsc.edu.br/julio.silveira/MaterialDidatico/Soldagem%20(Eletro%20II)/01%20-%20Introdu%C3%A7%C3%A3o/Estudo%20do%20Arco%20El%C3%A9trico.pdf)>. Acesso em: 12 Jun. 2019.

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.

SOUSA J. A. L., BARRAS. R. **Exposição à radiação em processos a arco elétrico: consequências à saúde e formas de controle.** Corte & Conformação de Metais. Aranda. São Paulo. 2012

SANTOS, M. **Curva característica de fontes de soldagem.** 2019. 2 fotografias. Disponível em: <<http://universowelding.blogspot.com/2009/09/curva-caracteristica-de-fontes-de.html>>. Acesso em: 12 Jun. 2019.

THOMAS, ALFRED M.; JUND, MICHEL. **Collision Repair and Refinishing: A Foundation Course for Technicians.** New York: DelmarCengage Learning. 2014