

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ADVAN LANHI

**ELABORAÇÃO DE UMA EPS PRÉ-QUALIFICADA PARA SOLDAGEM DE UMA
JUNTA DE TOPO COM CHANFRO EM V CURVADO PARA O PROCESSO MAG
EM UMA EMPRESA NO RAMO METAL MECÂNICO**

PATO BRANCO

2022

ADVAN LANHI

ELABORAÇÃO DE UMA EPS PRÉ-QUALIFICADA PARA SOLDAGEM DE UMA JUNTA DE TOPO COM CHANFRO EM V CURVADO PARA O PROCESSO MAG EM UMA EMPRESA NO RAMO METAL MECÂNICO

Elaboration Of a Pre-Qualified WPS For Welding a Butt Joint With a Groove Flare V For The MAG Process In a Company In The Mechanical Metal Branch

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk

Co-orientadora: Prof. Dr. Maria Nalu Verona Gomes

PATO BRANCO

2022



4.0 Internacional

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ADVAN LANHI

ELABORAÇÃO DE UMA EPS PRÉ-QUALIFICADA PARA A SOLDAGEM DE UMA JUNTA DE TOPO COM CHANFRO EM V CURVADO PARA O PROCESSO MAG EM UMA EMPRESA DO RAMO METAL MECÂNICO

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 01 de Dezembro de 2022.

Maria Nalu Verona Gomes
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Bruno Bellini Medeiros
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Paulo Cezar Adamczuk
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PATO BRANCO
2022**

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha irmã e minha mãe por me incentivar e apoiar durante todo o período da faculdade.

Agradeço aos meus amigos, em especial os que me ajudaram e me deram suporte durante o período da faculdade. (Dielle Corrêa, Yuri Onetta, Gabriel Froza, Jeová de Oliveira, Ricardo Pedro, Lucas Ramone, Jhonathan Steffens, Públio A. Klein, etc.)

Agradeço ao pessoal da empresa onde desenvolvi este trabalho, pela paciência e compreensão durante a realização dos testes, em especial meu chefe Aureo e os soldadores Nathan Tibes, Charles, Thiago Paulino, Ademar Gelinsk, José e Paulo.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk pelo incentivo ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A soldagem é um dos processos de união de materiais mais importantes e mais utilizados atualmente, devido, principalmente, à sua alta produtividade e seu baixo custo. Ademais, por apresentarem boas propriedades mecânicas. Entre os processos existentes o GMAW (Soldagem a arco elétrico com proteção gasosa, do inglês *Gas metal Arc welding* - MIG/MAG) é um dos mais utilizados, por apresentar relativa facilidade de execução. No entanto, a utilização de parâmetros incorretos (por exemplo, tensão de soldagem e corrente elétrica) podem ocasionar defeitos nas estruturas soldadas e resultar em soldas de baixa resistência. Para resolver estes problemas, os parâmetros de soldagem podem ser padronizados para um processo pré-definido, por meio da utilização de especificações de procedimentos de soldagem (EPS) desenvolvidos com base em normas ou códigos de soldagem. Nesse sentido, este trabalho propõe a elaboração de uma EPS pré-qualificada para o processo MAG aplicado à uma junta de topo com chanfro em V curvado. A junta em questão, é utilizada na fabricação de equipamentos desenvolvidos em uma indústria do ramo metal mecânico localizada na cidade de Vitorino- PR. A EPS pré-qualificada é elaborada para atender aos requisitos da norma AWS D1.1 – Código de Soldagem Estrutural para Aço. Foram realizadas soldas em corpos de prova de mesma geometria e material utilizados na empresa, alterando os parâmetros do processo, visando obter os parâmetros corretos e atender a norma. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, pois resultaram na produção de estruturas soldadas de qualidade e livre de defeitos.

Palavras-chave: EPS pré-qualificada. Processo de soldagem GMAW. MIG/MAG.

ABSTRACT

Welding is one of the most used and important processes for joining materials today, mainly due to its high productivity and low cost, also for presenting good mechanical properties. Among the existing processes, the GMAW (Gas Metal Arc Welding - MIG/MAG) is one of the most common due to its relatively easy way to perform it. However, the incorrect parameters use (e.g., welding voltage and current) can lead to defects in the welded structures resulting in low-strength welds. To solve these problems, welding parameters can be standardized for a pre-defined process with welding procedure specifications (WPS) developed based on welding standards parameters or codes. In this framework, this research proposes a pre-qualified WPS for the MAG (Metal Active Gas) process elaboration applied to a butt joint with a flare-V-groove weld. The butt joint at issue is used for equipment manufacturing in a *metal-mechanical industry* located in Vitorino (city), in Paraná (state), Brazil. The pre-qualified WPS is elaborated to meet the AWS D1.1 - Structural Welding Code for Steel requirements. Welds were performed on specimens of the same geometry and material used in the company, changing the process parameters to obtain the correct parameters and meet the standard. The results obtained were solid as they resulted in the quality welded structures production free of defects.

Keywords: Pre-qualified WPS. GMAW welding process. MIG/MAG.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação dos processos de soldagem.	20
Figura 2 - Representação esquemática do processo MIG/MAG.....	22
Figura 3 - Seções transversais dos tipos básicos de juntas.....	24
Figura 4 - Seção transversal de uma junta soldada mostrando 6 passes em 3 camadas.....	24
Figura 5 - Chanfros usuais em soldagem.	25
Figura 6 - Geometria e nomenclatura usual de chanfros.....	25
Figura 7 - Perfil de cordões de solda de alguns gases puros.....	30
Figura 8 - Etapas no modo de transferência por curto circuito (CC) em MIG....	33
Figura 9 - Oscilograma de um processo de soldagem realizado com transferência <i>spray</i>	35
Figura 10 - Angulação da tocha de soldagem negativa e positiva, respectivamente.....	38
Figura 11 - Posição recomendada da tocha para juntas de ângulo.....	38
Figura 12 - <i>Stick out</i> e posição do bico de contato no modo <i>Spray</i>	39
Figura 13 - Regulação Automática do Comprimento do Arco no Processo GMAW.....	40
Figura 14 - DBCP e DBP usual na soldagem por <i>spray</i>	41
Figura 15 - Representação esquemática de falta de fusão.....	43
Figura 16 - Representação esquemática da falta de penetração.	43
Figura 17 - Representação esquemática de mordeduras.	44
Figura 18 - Trincas decorrentes da soldagem.	44
Figura 19 - Posições de soldagem para juntas topo.....	45
Figura 20 - Posições de soldagem para juntas em ângulo.....	46
Figura 21 - Efeito do ângulo de deslocamento no perfil do cordão soldado.	47
Figura 22 - Métodos de aplicação dos processos de soldagem.	49
Figura 23 - Exemplo de macrografia de solda.	50
Figura 24 - Tipos de juntas utilizadas na empresa.....	58
Figura 25 - Aplicação e simbologia da junta topo com chanfro em V curvado.	61
Figura 26 - Medidas e configuração do perfil soldado 240mmx140mm.	67
Figura 27 - Medidas e configuração do perfil soldado 210mmx120mm.	68
Figura 28 - Representação transversal da junta e o cordão soldado.....	68

Figura 29 - Calibre de solda ZAAS <i>Precision</i>.....	70
Figura 30 - Calibre de raio.	70
Figura 31 - Medidor de vazão (fluxômetro/bibimetro).	71
Figura 32 - Parâmetros recomendados pelo fabricante de arame Gerdau.	72
Figura 33 - Serra fita horizontal.....	73
Figura 34 - Fluxograma para elaboração de EPS pré-qualificada.....	75
Figura 35 - Secionamento das amostras.....	77
Figura 36 - Macrografia das amostras soldadas em <i>spray</i>.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais gases utilizados na soldagem MIG/MAG.	29
Tabela 2 - Corrente crítica em função do gás de proteção, material e diâmetro do arame.	35
Tabela 3 - Requisitos para EPS pré-qualificada.	54
Tabela 4 - Variáveis essenciais para EPS pré-qualificada.	56
Tabela 5 - Tolerâncias das variáveis essenciais.	56
Tabela 6 - Exemplos de materiais aprovados para aplicação em EPS's pré-qualificadas.	57
Tabela 7 - Junta topo com chanfro em V curvado PJP pré-qualificada.	59
Tabela 8 - Legenda para a Tabela 7.	59
Tabela 9 - Especificações técnicas da fonte de alimentação ESAB.	62
Tabela 10 - Especificações técnicas das fontes SUMIG <i>Falcon</i> 402 e 502.	62
Tabela 11 - Especificações técnicas da fonte SUMIG <i>Falcon</i> 505.	62
Tabela 12 - Relação de arame e gás de soldagem.	64
Tabela 13: Temperatura mínima pré-qualificada de pré-aquecimento e interpasse.	64
Tabela 14 - Equivalência entre marcas comerciais e normas.	66
Tabela 15 - Propriedades mecânicas certificadas pelo fornecedor.	66
Tabela 16 - Análise química do metal base disponibilizado pelo fornecedor.	67
Tabela 17 - Composição química do arame de solda.	69
Tabela 18 - Parâmetros utilizados atualmente no processo de soldagem MAG pela empresa.	76
Tabela 19 - Valores medidos nas amostras de 1 à 12.	77
Tabela 20 - Resultado dos parâmetros testados para obter transferência por <i>spray</i>	78
Tabela 21 - Valores medidos nas amostras soldadas com transferência metálica por <i>spray</i>	80
Tabela 22 - Análise dos requisitos pra EPS pré-qualificada.	81
Tabela 23 - Modelo de EPS pré-qualificada.	82

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANSI	Instituto Nacional Americano de Normas (do inglês, <i>American National Standards Institute</i>);	-
ASME	Sociedade Norte-Americana de Engenheiros Mecânicos (do inglês, <i>American Society of Mechanical Engineers</i>);	-
ASTM	Sociedade Norte-Americana de Testes e Materiais (do inglês, <i>American Society for Testing and Materials</i>);	-
AWS	Sociedade Americana de Soldagem (do inglês, <i>American Welding Society</i>);	-
CA	Corrente Alternada;	A
CC (CV)	Corrente Contínua (<i>Constant Voltage</i>);	A
CCEN	Corrente Contínua com Eletrodo Negativo;	A
CCEP	Corrente Contínua com Eletrodo Positivo;	A
CJP	Penetração Completa da Junta (do inglês, <i>Complete Joint Penetration</i>);	-
EN	Norma europeia (do inglês, <i>European Standard</i>);	-
EPS	Especificação de Procedimento de Soldagem	-
FCAW	Soldagem à arco elétrico com arame tubular (do inglês, <i>Flux Cored Arc Welding</i>);	-
FCAW-G	Soldagem à arco elétrico com arame tubular e proteção gasosa (do inglês, <i>Gas Shilded Flux Cored Arc Welding</i>)	-
GMAW	Soldagem à arco elétrico sob proteção gasosa (do inglês, <i>Gas Metal Arc Welding</i>);	-
GTAW	Soldagem à arco elétrico e eletrodo de tungstênio (do inglês, <i>Gas Tungsten Arc Welding</i>);	-
MAG	Processo de soldagem com gás ativo (do inglês, <i>Metal Active Gas</i>)	-
MERCOSUL	Mercado Comum do Sul;	-
MIG	Processo de soldagem com gás inerte (do inglês, <i>Metal Inert Gas</i>)	-
NBR	Norma Brasileira;	-
Plug	Furo cheio de solda	-
PJP	Penetração Parcial da Junta (do inglês, <i>Partial Joint Penetration</i>);	-
SAW	Soldagem à Arco Submerso (do inglês, <i>Submerg Arc Welding</i>);	-
Slot	Ranhura/Abertura cheia de solda;	-
SMAW	Soldagem à arco Elétrico com Eletrodo Revestido (do inglês, <i>Shilded Metal Arc Welding</i>)	-
TIG	Soldagem à arco elétrico e eletrodo de tungstênio (do inglês, <i>Tungsten Inert Gas</i>)	-
WPS (EPS)	Especificação de Procedimento de Soldagem (do inglês, <i>Welding Procedure Specification</i>)	-

LISTA DE SÍMBOLOS

Ar	Argônio;	-
Al	Alumínio;	-
B	Boro;	-
C	Carbono;	-
Ca	Cálcio;	-
CO	Monóxido de Carbono;	-
CO ₂	Dióxido de Carbono;	-
Cr	Cromo;	-
Cu	Cobre;	-
D	Distância do ponto de tangência ao topo do membro;	[mm]
D _e	Diâmetro do eletrodo	[mm]
f	Face de raiz;	[mm]
FeO	Oxido de Ferro;	-
He	Hélio;	-
I	Corrente;	[A]
I _c	Corrente crítica;	[A]
L	Espessura limitada em CJP;	[mm]
Mg	Magnésio;	-
Mn	Manganês;	-
Mo	Molibdênio;	-
N	Nitrogênio;	-
Nb	Nióbio;	-
Ni	Níquel;	-
O ₂	Oxigênio;	-
P	Fósforo;	-
r	Raio de chanfro em meio J ou U;	[mm]
R	Abertura de raiz;	[mm]
S	Enxofre;	-
s	Tamanho mínimo de solda;	[mm]
Si	Silício;	-
Sn	Estanho;	-
T ₁ , T ₂	Espessura do metal base;	[mm]
Ti	Titânio;	-

U	Tensão;	[W]
u	Espessura ilimitada em CJP;	[mm]
V	Vanádio;	-
α, β	Ângulos de abertura do chanfro;	Graus (°)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	17
1.1.1 Objetivo Principal	17
1.1.2 Objetivos Específicos	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Soldagem	19
2.2 Soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo consumível (GMAW)	21
2.2.1 O arco elétrico	21
2.2.2 Processo MIG/MAG	22
2.3 Juntas	24
2.4 Fontes de soldagem	26
2.4.1 Transformador	27
2.4.2 Retificadores	28
2.4.3 Geradores	28
2.4.4 Inversoras	28
2.5 Gases de proteção	28
2.5.1 Generalidades de alguns gases	30
<u>2.5.1.1 Argônio e Hélio (Ar e He)</u>	<u>30</u>
<u>2.5.1.2 Adições de O₂ e CO₂ ao Ar ou He</u>	<u>30</u>
<u>2.5.1.3 CO₂ puro</u>	<u>31</u>
2.6 Modo de transferência	31
2.6.1 Transferência por Curto-Circuito	32
2.6.2 Transferência Globular	33
2.6.3 Transferência <i>Spray</i> ou Aerossol	33
2.6.4 Transferência controlada ou <i>spray</i> pulsado	36

2.7 Parâmetros de soldagem	36
2.7.1 Tensão de soldagem.....	36
2.7.2 Corrente de soldagem.....	37
2.7.3 Velocidade de soldagem.....	37
2.7.4 Ângulo da tocha de soldagem.....	37
2.7.5 <i>Stick out</i>	38
2.7.6 Diâmetro do eletrodo (D_e).....	39
2.7.7 Posição do bico de contato.....	39
2.7.8 Distância do bocal à peça (DBP) e Distância do Bico de Contato à Peça (DBCP).....	40
2.8 Descontinuidade e defeito	41
2.8.1 Descontinuidades comuns em solda.....	41
2.9 Descontinuidades estruturais	42
2.9.1 Porosidades.....	42
2.9.2 Inclusões de escória.....	42
2.9.3 Falta de fusão.....	42
2.9.4 Falta de penetração.....	43
2.9.5 Mordeduras.....	44
2.9.6 Trincas.....	44
2.10 Posições de soldagem	45
2.11 Orientação do eletrodo/arame	46
2.12 Métodos de aplicação dos processos de soldagem	47
2.12.1 Soldagem Manual.....	47
2.12.2 Soldagem Semiautomática.....	48
2.12.3 Soldagem Mecanizada.....	48
2.12.4 Soldagem Automatizada.....	48
2.12.5 Soldagem Robótica.....	48

2.12.6 Soldagem por Controle Adaptativo.....	48
2.13 Exame macrográfico	49
2.14 Especificações de procedimentos de soldagem - EPS.....	51
2.14.1 Cláusula 5 – Pré-qualificação de EPS's – AWS D1.1 (2020)	54
<u>2.14.1.1 Parte A: Desenvolvimento da EPS.....</u>	<u>54</u>
<u>2.14.1.2 Parte B: Metal base.....</u>	<u>57</u>
<u>2.14.1.3 Parte C: Juntas soldadas</u>	<u>57</u>
<u>2.14.1.4 Parte D: Processo de soldagem.....</u>	<u>61</u>
<i>2.14.1.4.1 Fontes de Soldagem</i>	<i>61</i>
<u>2.14.1.5 Parte E: Metal de adição e Gás de proteção.....</u>	<u>63</u>
<u>2.14.1.6 Parte F: Requisitos de temperatura de pré-aquecimento e interpasse</u>	<u>64</u>
<u>2.14.1.7 Parte G: Requisitos da EPS</u>	<u>64</u>
<u>2.14.1.8 Parte H: Tratamento térmico pós soldagem</u>	<u>65</u>
3 MATERIAIS E MÉTODOS	66
3.1 Metal base.....	66
3.1.1 Juntas Soldadas.....	67
3.2 Consumíveis	68
3.3 Coleta de dados.....	69
3.4 Definição dos parâmetros	71
3.5 Análise dos corpos de prova soldados.....	73
3.5.1 Macrografia	74
3.6 Conteúdo da eps	74
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	76
5 CONCLUSÕES	84
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	85
REFERÊNCIAS.....	86

ANEXO A – AMOSTRA EM BRANCO DE FORMULÁRIO PARA EPS SUJERIDO PELA AWS	89
ANEXO B – FORMATO SUGERIDO PARA EPS APRESENTADO PELA ASME SEÇÃO IX	91

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é um dos processos de união de materiais mais importantes atualmente e que possibilitou grandes avanços na indústria. Ela possui um vasto campo de aplicações, entre eles estão: estruturas metálicas, vasos de pressão, indústria aeronáutica, construção naval, tubulações, componentes eletrônicos, entre outros. Os processos de soldagem suprem várias necessidades atuais, como alta produtividade e baixo custo. Além disso, também podem apresentar grandes melhorias na resistência e na qualidade dos componentes fabricados (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982).

Existem vários tipos de processos de soldagem utilizados para a união de materiais, entre eles pode-se citar a soldagem por arco elétrico, o qual está entre os processos mais utilizados na indústria atualmente. O descobrimento do arco elétrico pelo inglês Sir Humphry Davy no início do século XIX, possibilitou a criação do processo de soldagem por arco elétrico. Porém, devido à falta de estabilidade e de equipamentos adequados, o processo de soldagem por arco elétrico só se tornou viável para a indústria cerca de 100 anos depois. O processo de soldagem a arco elétrico mais popular atualmente é o de eletrodo revestido, porém, um processo que vem ganhando espaço na indústria é o processo à arco elétrico com proteção gasosa, também denominado como GMAW (do inglês, *gas metal arc welding*) (Uma breve história da solda - Soldador, 2021).

O processo GMAW (do inglês, *gas metal arc welding*), mais conhecido como MIG/MAG (processo de soldagem com gás inerte, do inglês *metal inert gas* e processo de soldagem com gás ativo, do inglês *metal active gas*), tem evoluído constantemente. Este processo se resume no aquecimento localizado da região a qual se deseja unir, até que o material atinja o ponto de fusão, formando a poça de metal líquido que irá receber o metal de adição. Contudo, este processo é altamente sensível a variação de seus parâmetros, tais como: tensão e corrente de soldagem, gás de proteção, etc (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982).

Com a crescente evolução tecnológica e o surgimento de diferentes processos de soldagem, tem surgido também processos mais complexos. Porém, apesar dos equipamentos utilizarem tecnologias mais atuais, os processos de soldagem ainda apresentam problemas decorrentes de sua execução e seus parâmetros.

Além disso, devido a constante competitividade na indústria, as empresas buscam por processos que proporcionam altos níveis de produtividade e que resultem em produtos de qualidade.

Execuções e parâmetros incorretos utilizados durante o processo de soldagem resultam em cordões não uniformes e no aparecimento de defeitos, os quais afetam a qualidade da estrutura soldada (*AMERICAN WELDING SOCIETY, 2001*).

Em muitos casos, devido à falta de padronização do processo de soldagem, os operadores regulam de forma equivocada os parâmetros, baseando-se apenas no visual da solda, o que nem sempre resulta em uma solda de boa qualidade. A falta de padronização também pode acarretar em desperdícios de material, pois quando existem descontinuidades nos cordões soldados tem-se a necessidade de retrabalho nas estruturas soldadas.

Devido a isso, busca-se por uma forma de padronização desses processos, que tem como objetivo eliminar a ocorrência de descontinuidades. Além de resultar na redução de gastos com limpeza e retrabalho pós processo. Esta falta de padronização nos processos de soldagem pode ser resolvida com a utilização de uma especificação de processo de soldagem, comumente chamada EPS, desenvolvida de acordo com as normas vigentes, com a finalidade de determinar os melhores parâmetros para o caso a ser trabalhado. A EPS pode ser descrita como um documento onde contém instruções de como realizar a soldagem em uma junta específica, utilizando um determinado processo de soldagem (*AMERICAN WELDING SOCIETY, 2001*).

Para resolver os problemas de falta de padronização e aparecimento de descontinuidades, foi seguido a norma D1.1/D1.1M Código de Soldagem Estrutural – Aço da AWS (*American Welding Society*) que é aprovada pela ANSI (*American National Standards Institute*) e contém os requisitos para fabricar e montar estruturas de aço soldadas (*AMERICAN WELDING SOCIETY, 2020*).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Principal

O objetivo principal desse trabalho é elaborar uma especificação do procedimento de soldagem (EPS) pré-qualificada.

A EPS a ser desenvolvida tem como foco o processo de soldagem MAG, sendo que irá visar a execução do processo nos modos semiautomático e mecanizado, aplicado a uma junta de topo com chanfro em V curvado utilizado na montagem de um determinado equipamento produzido por uma empresa do ramo metal mecânico localizada no Paraná.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo principal os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- Realizar coleta de dados referentes ao processo de soldagem utilizado na empresa;
- Identificar os problemas recorrentes que devem ser solucionados;
- Utilizar o processo de soldagem MAG para realizar testes com diferentes parâmetros com a finalidade de atender a norma AWS D1.1 de 2020 – Código de Soldagem Estrutural para Aço e garantir que a solda executada apresente as propriedades requeridas por norma.
- Utilizar a norma AWS (Sociedade Americana de Soldagem, do inglês, *American Welding Society*) D1.1 *Structural Welding Code – Steel* (Código de Soldagem Estrutural – Aço), para determinar tolerâncias para os parâmetros, tais como corrente e tensão de soldagem, etc., a fim de atender os requisitos da mesma;
- Comparar os parâmetros utilizados atualmente pelos soldadores com os parâmetros obtidos para atender a norma;
- Identificar os requisitos que devem ser seguidos para que a EPS possa ser feita e o que deve conter na EPS escrita;

- Elaborar a especificação do procedimento de soldagem (EPS) detalhada para o processo de soldagem à arco elétrico com proteção de gás ativo (MAG).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Soldagem

Atualmente, a soldagem é amplamente utilizada nas mais diversas aplicações, quando se trata da união de materiais, em sua maioria metálicos. Por ser um processo simples e utilizar quantidades relativamente pequenas de material, este processo se sobressai diante dos demais processos de união de materiais (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982).

Segundo a norma A 3.0 da AWS, a soldagem é um processo que a partir do qual se obtém a união de dois materiais por aquecimento até a temperatura de soldagem, a qual pode ocorrer juntamente com a presença de pressão, ou apenas por aplicação de pressão, e com ou sem o uso de material de adição (*AMERICAN WELDING SOCIETY*, 2001).

Na soldagem, a união de dois materiais ocorre pela fusão através do contato entre eles, ou pela fusão de ambos juntamente com um terceiro material, o qual é chamado material de adição. Também pode ocorrer por contato dos materiais na fase sólida ou semissólida (MACHADO, 2007).

Com a descoberta da energia elétrica, os processos de soldagem foram amplamente desenvolvidos, e isto pode ser comprovado pelo fato de que os processos mais utilizados nos dias atuais foram desenvolvidos a partir do final do século 19 (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982).

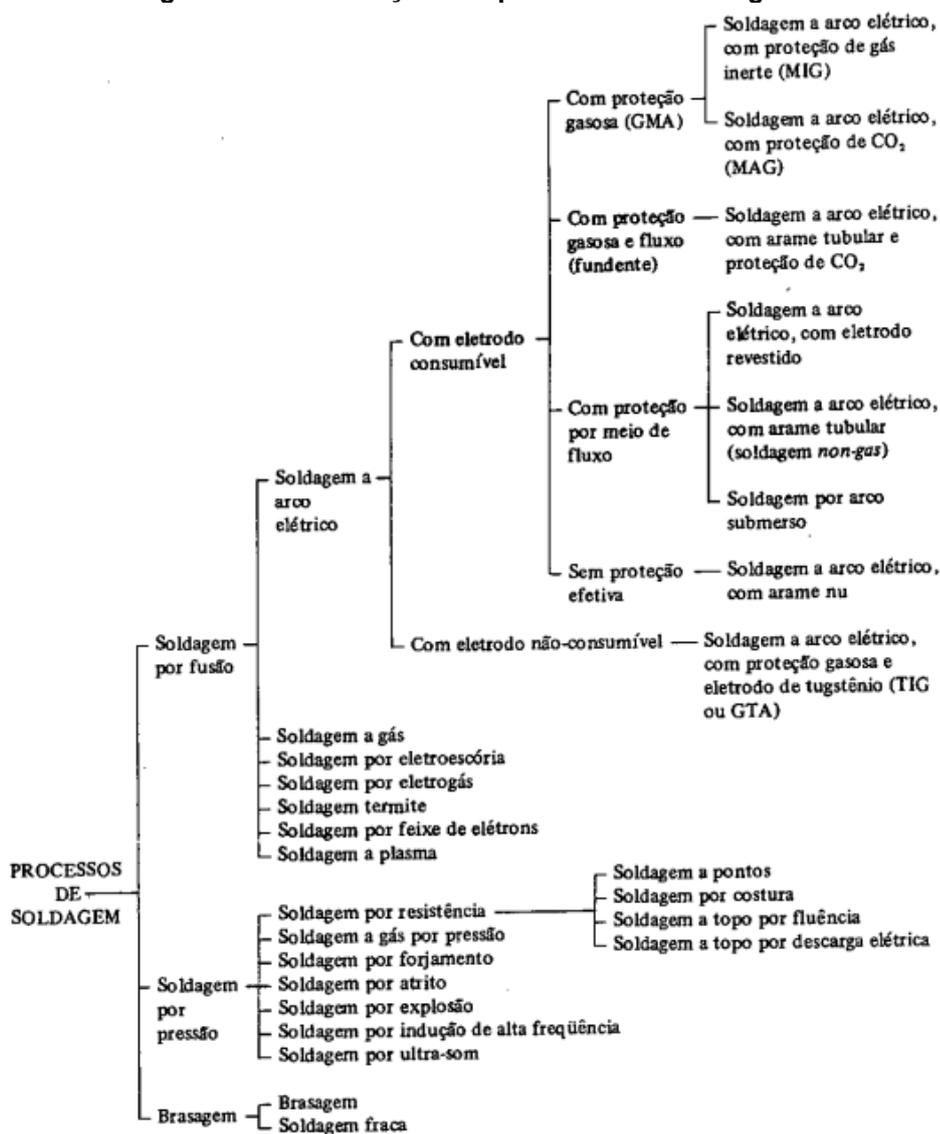
A primeira utilização do arco elétrico na soldagem foi em 1885, realizada por Bernardos, o qual obteve o arco com o auxílio de um eletrodo de grafita. Após o fechamento do circuito elétrico, o eletrodo era mantido à cerca de dois mm de distância do metal base, gerando assim, o arco elétrico. O calor gerado pelo arco elétrico era suficiente para proporcionar a fusão do metal-base e do metal de adição (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982).

Conforme Okumura e Taniguchi (1982), atualmente existem em utilização comercial, em torno de cinquenta processos de soldagem, os quais podem ser classificados de acordo com o processo físico envolvido, as aplicações específicas, o tipo de fonte de soldagem utilizada, ou segundo alguma outra característica própria do processo. A classificação mais usual é dada em função do processo físico envolvido, que podem ser divididos em:

- Soldagem por fusão: processo onde os componentes (metal base e metal de adição) são fundidos por meio de energia elétrica ou química, sem aplicação de pressão;
- Soldagem por pressão: processo onde os componentes são coalescidos e pressionados um contra o outro;
- Brasagem: processo onde os componentes são unidos por meio de uma liga metálica com baixo ponto de fusão. Neste processo o metal base não é fundido.

A Figura 1 apresenta uma classificação dos processos de soldagem divididos segundo o processo físico envolvido.

Figura 1 - Classificação dos processos de soldagem.



Fonte: Okumura e Taniguchi (1982).

2.2 Soldagem a Arco Elétrico com Proteção Gasosa e Eletrodo Consumível (GMAW)

Atualmente, na indústria, existe a procura por processos de soldagem que possuam maior taxa de deposição, menor perda de material e que possibilitem a operação por longos períodos de tempo. Neste contexto, tem-se os processos de soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo consumível, mais especificamente os processos MIG/MAG, os quais vêm ganhando espaço no mercado e estão substituindo o processo de soldagem por eletrodo revestido (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982)

O princípio fundamental da soldagem por arco elétrico com proteção gasosa consiste na formação do arco elétrico entre a peça e um eletrodo consumível que é continuamente alimentado. O gás, ou mistura de gases, utilizado no processo tem a função de proteger a poça de fusão de fatores externos, sendo que este pode ou não reagir com a poça de fusão. Gases que reagem com a poça de fusão são chamados de gases ativos e são utilizados no processo MAG (do inglês, *Metal Active Gas*). Analogamente, os gases ditos inertes, não reagem com a poça de fusão e são utilizados no processo MIG (do inglês, *Metal Inert Gas*) (MACHADO, 2007)

Nos processos de soldagem com proteção gasosa é possível realizar a soldagem em todas as posições desejadas. Fato esse que possibilita a aplicação do processo em modo automático ou semiautomático (MACHADO, 2007).

2.2.1 O arco elétrico

Para materiais metálicos, a fonte de calor mais utilizada para fundir os materiais no processo de soldagem é o arco elétrico. Isso se dá ao fato de apresentar boas características, como concentração adequada de energia para a fusão localizada do metal de base, facilidade de controle, baixo custo de equipamento, em relação a outros processos, e nível aceitável de risco à saúde dos operadores (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

O arco elétrico pode ser definido como:

O arco elétrico consiste de uma descarga elétrica, sustentada através de um gás ionizado, a alta temperatura, conhecido como plasma, podendo produzir energia térmica suficiente para ser usado em soldagem, pela fusão localizada

das peças a serem unidas (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011, p. 51).

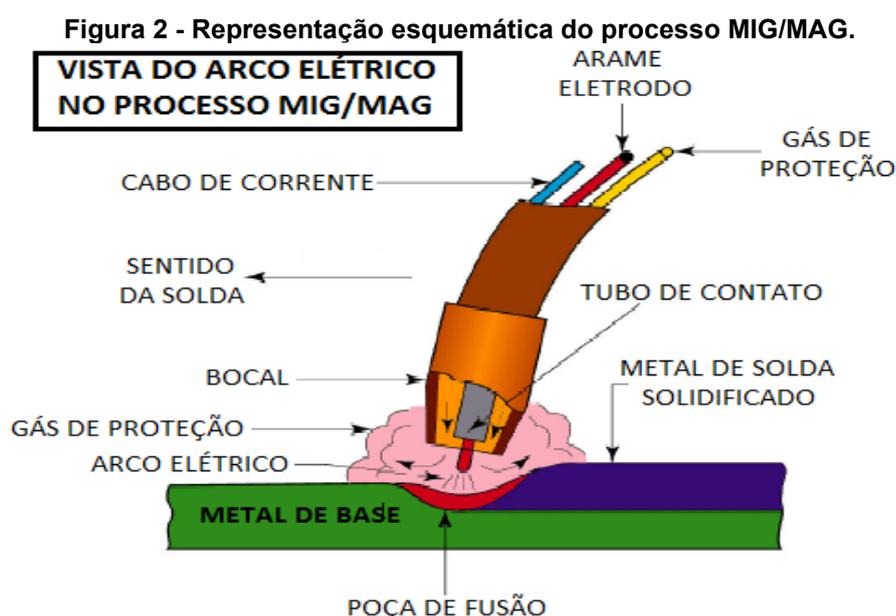
Além disso, o arco de soldagem pode ser definido como um condutor gasoso (ionizado – chamado de plasma) que transforma energia elétrica em calor. Além de fornecer calor para a soldagem, o arco também pode atuar na remoção de oxidantes da superfície a ser soldada. Ademais, o arco também influencia no modo de transferência do metal de adição do eletrodo para a peça (*WELDING SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 2001).

2.2.2 Processo MIG/MAG

O processo de soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo consumível recebe as seguintes denominações:

- MIG (*Metal Inerte Gas*): utiliza gás inerte para proteção da poça de fusão, ou seja, ele não reage fisicamente com a poça;
- MAG (*Metal Active Gas*): utiliza gás de proteção ativo, porque interage fisicamente com a poça de fusão.
- GMAW (*Gas Metal Arc Welding*): denominação geral do processo de soldagem a arco com proteção gasosa.

A Figura 2 mostra uma representação esquemática do processo MIG/MAG.



Fonte: SUMIG (2018).

Geralmente os processos MIG/MAG é são semiautomáticos, onde a alimentação do arrame é feita por um dispositivo mecânico, sendo que o início e o término da soldagem são de responsabilidade do soldador, além dos outros movimentos necessários na execução do processo. A alimentação contínua do arrame é responsável por manter o funcionamento do arco, o qual apresenta comprimento aproximadamente constante, independentemente dos movimentos do operador (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

Os processos MIG/MAG podem ser utilizados na soldagem de uma ampla faixa de espessuras e podem ser empregues em materiais ferrosos e não ferrosos. O processo MAG é utilizado apenas na soldagem de materiais ferrosos e necessita de CO₂ ou misturas de gás para a proteção da poça de fusão. Já o processo MIG é mais versátil, podendo ser utilizado para a soldagem de materiais ferrosos e não ferrosos (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

É possível listar algumas vantagens desses processos:

- Alta taxa de deposição;
- Alto fator de trabalho do soldador, ou seja, o processo pode ser executado em longos períodos de trabalho;
- Podem ser utilizados para soldar amplas faixas de espessuras e diversos tipos de materiais;
- Exigem menor nível de habilidade do soldador, se comparados com o processo de eletrodo revestido.

Porém, como todo processo, o MIG/MAG também apresentam desvantagens:

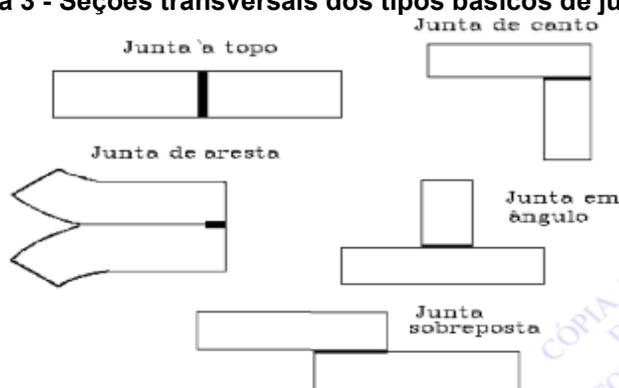
- Grande sensibilidade do arco de soldagem em relação à variação dos parâmetros elétricos de operação. Ou seja, qualquer mudança nos parâmetros elétricos, (corrente, tensão, por exemplo) ocasionam variação no arco elétrico de soldagem;
- Requer ajustes precisos dos parâmetros;
- Equipamento de custo e manutenção mais caros, se comparado com o de eletrodo revestido;
- Menor variedade de consumíveis (MICALLI JR, BATALHA, *et al.*, 2002).

2.3 Juntas

Recebe-se a denominação de junta, as partes da peça nas quais são submetidas a soldagem ou brasagem. As juntas podem apresentar diferentes formas em suas bordas, a fim de ocorrer a união delas de forma econômica e tecnicamente aceitável. A escolha do tipo de borda da junta ocorre em razão dos requisitos de projeto, espessura das peças, processo de soldagem utilizado e distorção admissível (MACHADO, 2007).

A Figura 3 apresenta os 5 tipos básicos de juntas.

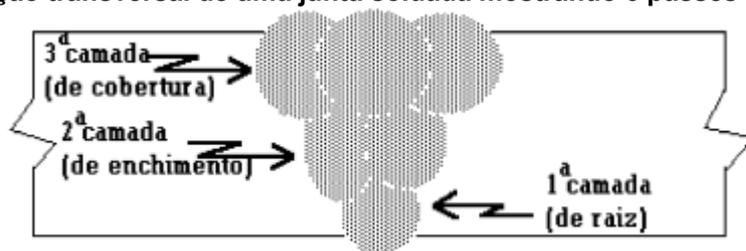
Figura 3 - Seções transversais dos tipos básicos de juntas.



Fonte: Machado (2007).

Há casos em que a junta soldada pode ser preenchida com apenas 1 passe (ou cordão) de solda, e em outros casos é necessário a realização de 2 ou mais passes. Quando são depositados passes sobre outros passes, forma-se o que é chamado de camadas (ou níveis). Na Figura 4 é mostrado um exemplo de junta preenchida com seis passes em três camadas (MACHADO, 2007).

Figura 4 - Seção transversal de uma junta soldada mostrando 6 passes em 3 camadas.



Fonte: Machado (2007).

Existem casos em que não é possível fundir toda a espessura das peças, quando as faces da junta estão paralelas entre si. Por este motivo, existem configurações, chamadas chanfros, nas quais as faces são biseladas e apresentam diferentes geometrias (MACHADO, 2007).

A Figura 5 apresenta as principais configurações de chanfros para a soldagem (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2020).

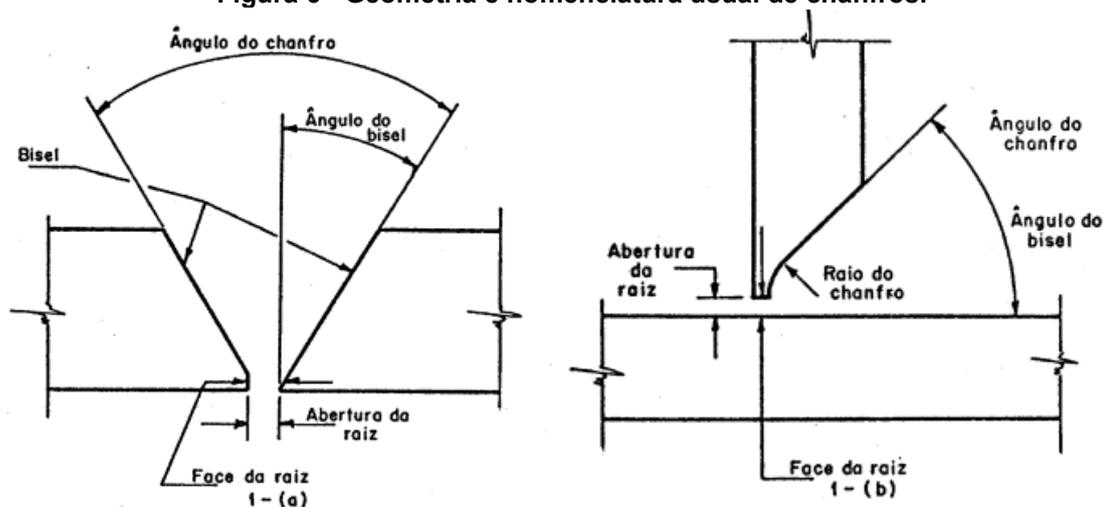
Figura 5 - Chanfros usuais em soldagem.

Soldas de Chanfro (Groove Welds)							
Quadrado (Square)	Inclinado (Scarf)	V	Bisel (Bevel)	U	J	V Curvado (Flare V)	Bisel Curvado (Flare Bevel)
							

Fonte: AWS 2.4 (1998)

A Figura 6 apresenta a geometria e terminologia usual dos chanfros, as quais tem relação direta entre a espessura da peça, tipo de chanfro e o volume do metal de solda depositado (MACHADO, 2007).

Figura 6 - Geometria e nomenclatura usual de chanfros.



Fonte: ABNT NBR 10474 (1988).

2.4 Fontes de Soldagem

Todos os processos de soldagem usam de algum tipo de fonte de energia para seu funcionamento. Na maioria dos processos a fonte de energia fornece calor para a junção dos materiais. As fontes de energia mais utilizadas podem ser agrupadas em cinco categorias: elétricas, químicas, focalizadas, mecânicas e de estado sólido (*AMERICAN WELDING SOCIETY, 2001*).

As fontes utilizadas na soldagem passaram por grandes mudanças desde o início de sua utilização, principalmente nas últimas três décadas. Comercialmente são encontradas tanto máquinas convencionais, desenvolvidas nas décadas de 50 e 60, quanto fontes mais tecnológicas desenvolvidas mais recentemente, nas décadas 70 a 90 (*MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011*).

O projeto de uma fonte de energia deve ser desenvolvido de acordo com o processo ao qual será destinada, apresentando resistência e durabilidade ao ambiente onde será utilizada, interface de simples entendimento do operado e estar em conformidade com as normas e códigos relativos a estes equipamentos (*MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011*).

As fontes de soldagem devem apresentar três características intrínsecas:

- Atender a um ou mais processos em relação as correntes e tensões de soldagem produzidas;
- Permitir o ajuste destas correntes e tensões de soldagem;
- Controlar os níveis de corrente e tensão de soldagem com base nos requisitos demandados durante a soldagem (*MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011*).

Nos processos MIG/MAG, há duas formas de se conseguir que a velocidade de operação de soldagem seja próxima da velocidade de alimentação: 1) mantendo o comprimento do arco relativamente constante, no qual o equipamento controla a velocidade de alimentação, igualando assim, à velocidade de fusão, ou 2) mantendo a velocidade de alimentação constante e permitir variações nos parâmetros de soldagem, fazendo que a velocidade de consumo se mantenha praticamente constante e igual à velocidade de alimentação (*MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011*).

Na primeira opção, para obter velocidade de fusão aproximadamente constante, utiliza-se uma fonte com corrente constante (CC, do inglês, *Constant Current*) e alimentador de arame com velocidade de alimentação variável. Isso é feito a partir da comparação entre a tensão do arco e um valor de referência, e também pela variação da velocidade de alimentação, compensando as diferenças entre a tensão instantânea no arco e a tensão de referência. Esta opção é raramente utilizada na prática (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

Na segunda opção, a fonte utilizada é do tipo tensão constante (CV, do inglês, *Constant Voltage*) e o alimentador de arame com velocidade de alimentação constante. As mudanças no comprimento do arco causam grandes alterações na corrente de soldagem, variando de forma contrária, ou seja, quando um aumenta o outro diminuí, e a velocidade de alimentação acompanhando a corrente de soldagem. Esta é a opção usualmente utilizada nos processos (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

Existem diversas formas de classificar as fontes de potência para soldagem, apenas pelo tipo não é possível caracterizar adequadamente estes equipamentos. O controle da potência é realizado através da alteração da resistência dos campos magnéticos, independentemente do caso. Geralmente classifica-se em dois grandes grupos:

- Máquinas rotativas: onde a potência é gerada pelo próprio sistema. Sendo gerada por motor elétrico ou motor de explosão interna.
- Máquinas estáticas: onde a potência é convertida por meios mecânicos, elétricos, eletrônicos ou alternando o acoplamento das bobinas e sendo ajustada pela variação da indutância. Os dois tipos contidos neste grupo são o transformador e o transformador/retificador (MACHADO, 2007).

2.4.1 Transformador

Equipamento responsável pela transformação da alta tensão e baixa corrente elétrica recebida da rede, para baixa tensão e alta corrente elétrica utilizada na soldagem em corrente alternada (CA) (MACHADO, 2007).

2.4.2 Retificadores

Neste equipamento, a corrente contínua (CC) é obtida através da CA por meio de dispositivos eletrônicos de estado sólido, denominados diodos. Os diodos apresentam grande resistência a passagem da corrente elétrica em um sentido e no sentido contrário essa resistência é praticamente nula (MACHADO, 2007).

2.4.3 Geradores

As bobinas neste tipo de equipamento recebem CA e geram um campo magnético que, através de comutadores, é transformado em CA ou CC e a tensão de saída controlada por um reostato (MACHADO, 2007).

2.4.4 Inversoras

Nos sistemas convencionais, as perdas elétricas e o volume dos transformadores são inversamente proporcionais à frequência da corrente de entrada (da rede).

O sistema inversor é configurado de forma que os componentes sólidos utilizados convertem a corrente elétrica recebida em CA de alta frequência, resultando em uma fonte com dimensões menores que as convencionais (MACHADO, 2007).

2.5 Gases de Proteção

Nos processos de soldagem MIG/MAG são utilizados basicamente gases inertes ou ativos, ou ainda uma mistura desses dois tipos. O tipo de gás interfere diretamente em algumas características do processo e da junta soldada. No que diz respeito ao processo, podemos citar: as características do arco, da transferência do metal de adição e da velocidade de soldagem. Já para a junta soldada temos: penetração, largura e formato do cordão de solda e a tendência de aparecimento de defeitos (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

Em relação a denominação das misturas dos gases de proteção como ativo e inerte, ainda não existe uma regra exata acerca da porcentagem que determina quando uma mistura passa a ser ativa ou se mantém inerte, e vice-versa. Na prática, assume-se o comportamento em soldagem e o modo como ocorre a transferência metálica como determinantes na porcentagem correta onde ocorre a transição (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982).

Na Tabela 1 observamos os principais gases e misturas utilizados na soldagem MIG/MAG:

Tabela 1 - Principais gases utilizados na soldagem MIG/MAG.

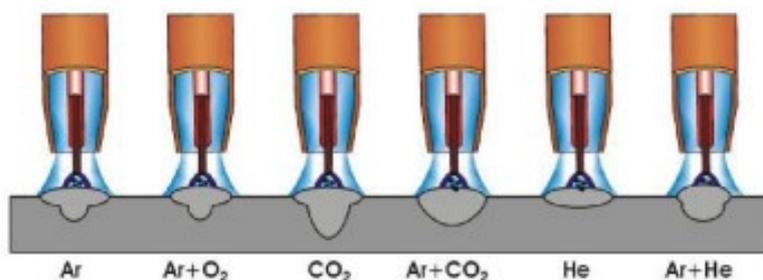
Gás ou mistura	Comportamento Químico	Aplicações
Argônio (Ar)	Inerte	Quase todos os metais (- aço)
CO ₂	Oxidante	Aços carbono e alguns baixa liga
Hélio (He)	Inerte	Al, Mg, Cu e suas ligas
Ar + 20 a 50% He	Inerte	Idem Hélio (melhor que 100%)
Ar + 1 a 2% O ₂	Ligeiramente oxidante	Aços inox, algumas ligas de Cu
Ar + 3 a 5% O ₂	Oxidante	Aços carbono e alguns baixa liga
Ar + 20 a 50% CO ₂	Oxidante	Diversos aços – transferência curto circuito
Ar + 5 a 25% CO ₂	Oxidante	Aço carbono, baixa liga e alguns aços inoxidáveis
Ar + CO ₂ + O ₂	Oxidante	Diversos aços

Fonte: Adaptado de Marques, Modenesi e Bracaense (2001).

Nos metais não ferrosos, especialmente os mais reativos como o alumínio, o magnésio e o titânio, são utilizados gases inertes puros. Em materiais ferrosos, tem-se a adição de pequenas quantidades de gases ativos, o que resulta em uma melhora na estabilidade do arco e na transferência do metal de adição. Para obter uma diminuição nos custos de soldagem em aços carbono e baixa liga, é utilizado o CO₂, ou uma mistura deste, como gás de proteção. Essas misturas de gases ativos e inertes melhoram as condições de soldagem em aplicações específicas de acordo com a necessidade do processo (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

A Figura 7 mostra o perfil do cordão de solda característico obtido com o uso de gases puros e misturas de gases mais utilizadas. Contudo, vale ressaltar que o perfil do cordão de solda também é alterado devido às variações nos parâmetros de soldagem (MICALLI JR, BATALHA, *et al.*, 2002).

Figura 7 - Perfil de cordões de solda de alguns gases puros.



Fonte: Senai (2008).

2.5.1 Generalidades de alguns gases

Nesta subseção serão apresentadas as principais generalidades dos gases mais utilizados na indústria em processos de soldagem.

2.5.1.1 Argônio e Hélio (Ar e He)

Geralmente são utilizados para soldar metais não ferrosos, pois, quando são utilizados puros em ligas ferrosas, tendem a causar instabilidade e respingos.

O gás He causa maior penetração na soldagem, pois apresenta maior condutividade térmica que o gás Ar. O gás He apresenta maior potência de arco do que o Ar para mesmos níveis de corrente, por isso é mais utilizado para a soldagem de materiais de maiores espessuras. O Argônio é preferível em ligas ferrosas, chapas finas e em soldagem fora da posição plana. Devido a maior leveza do Hélio em relação ao Argônio, o consumo deste também é maior. O Hélio geralmente é de custo mais elevado que o Argônio, além deste último ser melhor para a obtenção da transferência por spray (MICALLI JR, BATALHA, *et al.*, 2002).

2.5.1.2 Adições de O₂ e CO₂ ao Ar ou He

As misturas de Argônio ou Hélio com O₂ ou CO₂, e em alguns casos, a mistura com ambos, apresentam melhoras na transferência metálica, estabilidade do arco e diminuem a formação de respingos nos aços. Porém, também pode apresentar porosidades e perdas de elementos de liga devido a sua característica desoxidante, e

isso pode ser evitado utilizando arames com desoxidantes (MICALLI JR, BATALHA, *et al.*, 2002).

2.5.1.3 CO₂ puro

O CO₂ puro é relativamente mais barato em comparação com os demais gases, devido a isso este gás vem sendo muito utilizado para a soldagem de aços carbono. Este gás torna viável a realização das transferências metálicas pelo modo globular e curto circuito, e não sendo possível para o modo spray (MICALLI JR, BATALHA, *et al.*, 2002).

Em altas temperaturas do arco, tem-se a decomposição do CO₂ em CO e O₂. O O₂ provoca a oxidação do metal base, gerando FeO que por sua vez reage com o carbono da poça de fusão liberando CO, resultando em porosidades no cordão de solda. Já em temperaturas mais baixas, uma quantidade desse CO se transforma em carbono e oxigênio. Dependendo da quantidade original de carbono existente, isto pode resultar em aumento ou diminuição da quantidade final de carbono no cordão solidificado. Para evitar esse fenômeno, é recomendável utilizar arames com grandes quantidades de desoxidantes em sua composição (MICALLI JR, BATALHA, *et al.*, 2002).

2.6 Modo de Transferência

O modo como ocorre a transferência do metal fundido a partir do eletrodo até a peça é estipulado por complexas interações de forças, onde, no processo MIG, são instigadas pelos seguintes fatores:

- Natureza do gás de proteção;
- Polaridade e tipo (contínuo ou pulsado) da corrente elétrica;
- Densidade da corrente elétrica;
- Tensão;
- Extensão do eletrodo após o contato elétrico;
- Composição química e diâmetro do eletrodo;
- Características específicas da fonte de potência;
- Pressão do ambiente (MACHADO, 2007).

O modo de transferência do metal fundido da ponta do arame de soldagem para a peça tem grande importância nos processos MIG/MAG, pois afeta muitas das características do processo, entre elas estão:

- A estabilidade do arco;
- A quantidade de gases absorvida pela poça de fusão;
- A possibilidade de utilização em certas posições de soldagem;
- E a quantidade de respingos gerados durante o processo.

Pode-se considerar a existência de quatro tipos de transferência: por curto circuito, globular, por “*spray*” ou aerosol, e controlada (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

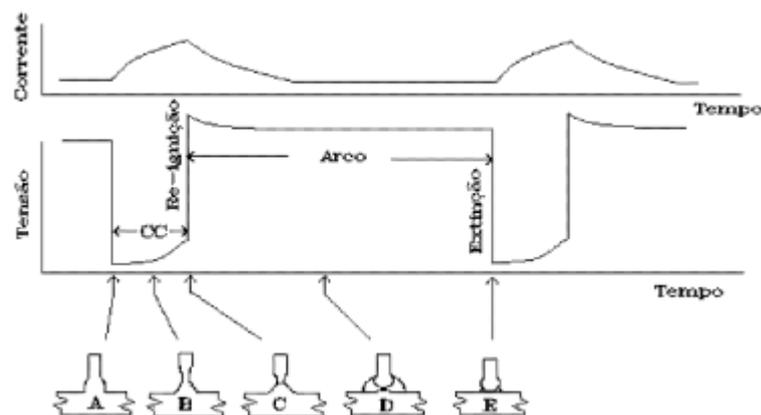
2.6.1 Transferência por Curto-Circuito

Este tipo de transferência é caracterizado pelo uso de baixos valores de tensão e corrente de soldagem. Normalmente é utilizado em posições diferentes da posição plana ou para realizar a soldagem de peças de baixa espessura, ou seja, quando necessita-se de baixas energias de soldagem. A gota é formada na ponta do arame e cresce de tamanho até haver o contato com a poça de fusão, e é então atraída para a poça devido a ação da tensão superficial (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

Geralmente ocorre em faixas de corrente de 30 a 200 A e tensão de 15 a 22 V quando utilizado arame mais finos. A poça de fusão originada por este modo de transferência é relativamente pequena e de solidificação rápida (MACHADO, 2007).

Neste modo, a corrente e a tensão de soldagem variam consideravelmente sua amplitude, como mostrado na Figura 8 e pode apresentar curtos-circuitos em frequências de 20 até valores superiores a 200 Hz (MACHADO, 2007).

Figura 8 - Etapas no modo de transferência por curto circuito (CC) em MIG.



Fonte: Machado (2007).

Uma característica deste modo de transferência é a grande instabilidade do arco, o que resulta na formação de uma quantidade grande de respingos, no entanto, isso pode ser amenizado com o uso de parâmetros corretos e pela regulação da indutância na fonte de energia (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

2.6.2 Transferência Globular

Este modo diferencia-se do anterior por fazer uso de valores médios de tensão e corrente de soldagem, resultando em um arco mais estável, porém, a transferência é mais imprevisível e caótica. O tamanho das gotas formadas varia com os valores da corrente de soldagem, ao passo que a corrente aumenta, o tamanho das gotas diminui, mas geralmente as gotas apresentam tamanho maior que o diâmetro do eletrodo. Neste modo o nível de respingos é relativamente maior que no modo de transferência anterior, e as gotas se transferem para a poça de fusão pela ação da gravidade, com isso este modo se limita a soldagem na posição plana (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

2.6.3 Transferência *Spray* ou Aerossol

Com o aumento da corrente de soldagem, o diâmetro médio das gotas diminui, e em uma certa faixa de valores de corrente (maiores que a faixa de corrente utilizada no modo de transferência globular) tem-se a mudança do modo de transferência de globular para *spray*. Neste modo, o tamanho médio das gotas geradas é menor que o

diâmetro do arrame. O arco gerado neste modo é muito estável e quase não há geração de respingos (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

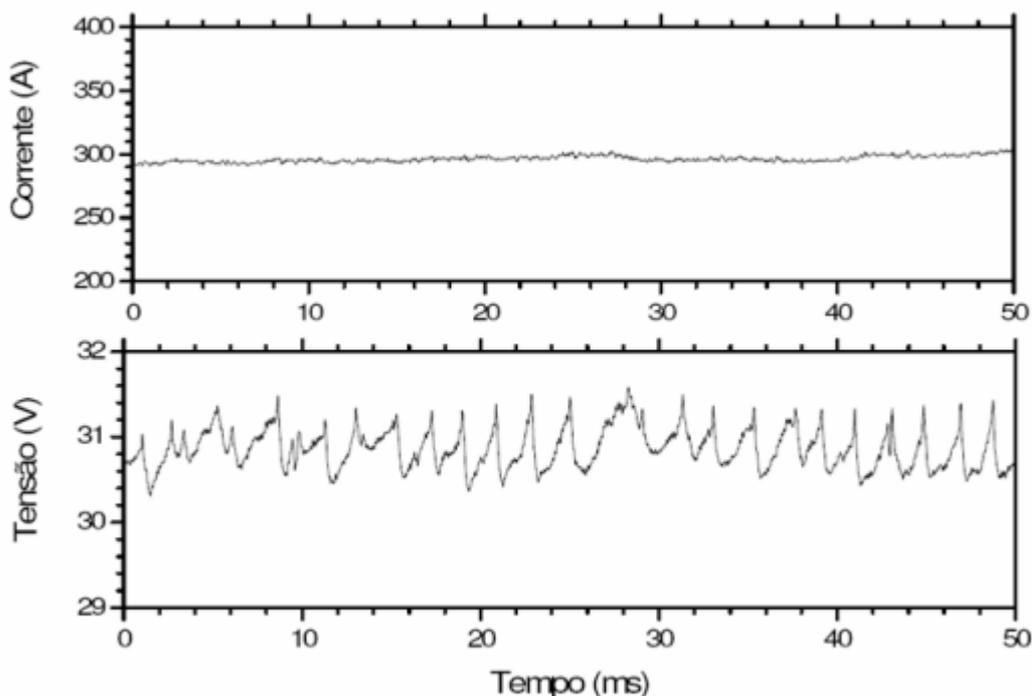
Neste tipo de transferência, as gotas geradas sofrem a ação de várias forças eletromagnéticas, de maior intensidade que a força gravitacional. Devido a isso, este modo de transferência pode ser utilizado em qualquer posição. Contudo, devido as correntes de soldagem muito altas, torna-se muito difícil o controle da soldagem, o que resulta na soldagem apenas na posição plana (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

Acima de uma certa intensidade de corrente, utilizando-se gases inertes ou levemente oxidantes, o metal na ponta do eletrodo alcança sua temperatura de vaporização. A penetração e a taxa de deposição são maiores neste modo devido aos maiores valores de corrente e tensão requeridos. A aparência e o ruído do arco apresentam uma significativa transformação devido à esta mudança no modo de transferência. Também é importante salientar que não é possível obter este modo de transferência com a utilização de gases altamente oxidantes (MACHADO, 2007).

Conforme a corrente de soldagem aumenta, há uma notável mudança na frequência e no volume das gotas, ocasionando no aumento do primeiro e na diminuição do segundo. O valor (ou faixa) de corrente de soldagem onde ocorre essa alteração é chamado de “corrente de transição” ou “corrente crítica”, e acima deste valor obtém-se o modo de transferência por spray ou aerossol (MACHADO, 2007).

Portanto, o modo de transferência metálica por spray ocorre de maneira muito estável, com mínimas perturbações do arco e poucos respingos. A Figura 9 apresenta um oscilograma característico do modo de transferência spray, em uma soldagem realizada com arame ER70S6 de 1.2 mm de diâmetro e gás 98% Ar e 2% O₂ (MODENESI e BRACARENSE, 2007).

Figura 9 - Oscilograma de um processo de soldagem realizado com transferência *spray*.



Fonte: Modenesi e Bracarense (2007).

A corrente crítica é função da seção transversal do arame e da extensão dele, levando a existência de uma “densidade crítica de corrente” se as outras condições forem mantidas sem alterações. Esta corrente crítica I_c (A) pode ser aproximadamente determinada a partir do diâmetro D_e (mm) do eletrodo para diferentes materiais e gases de proteção. A Tabela 2 mostra as equações que podem ser utilizadas para determinar esta corrente crítica em função do arame, para arames com bitolas entre 0,8 e 2,4 mm (MACHADO, 2007).

Tabela 2 - Corrente crítica em função do gás de proteção, material e diâmetro do arame.

Material do arame	Gás de proteção	Corrente crítica I_c (A)
Aços ao carbono e baixa liga	98% Ar + 2% O ₂	$151 \cdot D_e + 156$
	95% Ar + 5% CO ₂	$139 \cdot D_e + 41$
	82% Ar + 18% O ₂	$218 \cdot D_e + 26$
Aços inoxidáveis austeníticos	99% Ar + 1% O ₂	$164 \cdot D_e + 24$
Cobre desoxidado	Ar	$186 \cdot D_e + 15$
Bronze de silício	Ar	$150 \cdot D_e + 32$
Alumínio 1100	Ar	$51 \cdot D_e + 59$
Alumínio 5183	Ar	$59 \cdot D_e + 88$

Fonte: Machado (2007).

Também deve-se utilizar a extensão do arame após o bico de contato de 20 mm, assim, qualquer corrente de soldagem acima do valor calculado deverá resultar em transferência spray, podendo variar um pouco devido a mudanças em outros fatores (MACHADO, 2007).

2.6.4 Transferência controlada ou *spray* pulsado

A transferência controlada é ocasionada pela introdução de perturbações controladas na corrente de soldagem e/ou na alimentação de arame. A finalidade dessas perturbações é obter uma transferência do metal de adição com características da transferência por spray, mas com níveis mais baixos de corrente, possibilitando a utilização em chapas finas e posições não planas (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

2.7 Parâmetros de soldagem

São ditos parâmetros de soldagem as variáveis que, quando alteradas, influenciam na geometria do cordão, propriedades mecânicas, defeitos operacionais e estabilidade do arco, os quais são: tensão, corrente, velocidade, ângulo da tocha, *stick out*, vazão de gás, diâmetro do eletrodo, etc. (MACHADO, 2007).

2.7.1 Tensão de soldagem

Quando a tensão de soldagem é baixa, a tendência é formar um cordão estreito, enquanto que com o aumento da tensão de soldagem, o cordão fica mais largo e achatado, podendo também, provocar um aumento na quantidade de respingos. Ao utilizar o CO₂ como gás de proteção, valores mais altos de corrente e tensões mais baixas, a penetração aumenta e a incidência de respingos diminui (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982).

O valor mais apropriado de tensão é definido em função da intensidade da corrente de soldagem, tipo do arame e do gás de proteção e levando em consideração a geometria do cordão que se deseja obter (MACHADO, 2007).

Valores muito baixos de tensão podem resultar no aparecimento de porosidades, sobreposição, cordão estreito e convexo. Por outro lado, tensões muito altas também resultam em porosidade, respingos e mordedura devido ao aumento do arco (MACHADO, 2007).

2.7.2 Corrente de soldagem

A penetração e a taxa de deposição são diretamente influenciadas por este parâmetro, normalmente levando à um aumento de ambas (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982).

Nos quesitos penetração, reforço, modo de transferência e taxa de deposição, a corrente de soldagem é o parâmetro com maior influência na soldagem (MACHADO, 2007).

2.7.3 Velocidade de soldagem

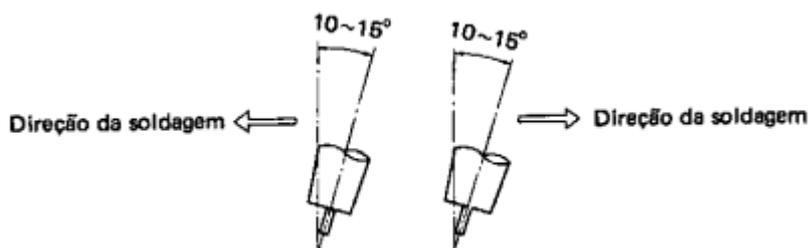
Geralmente com o aumento da velocidade de soldagem, tem-se uma queda na penetração e geração de um cordão mais estreito e convexo. Em velocidades mais elevadas pode-se observar o aparecimento de mordeduras no cordão de solda (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982).

Quando se mantém os outros parâmetros e aumenta a velocidade, pode ocorrer os seguintes resultados: menor distorção da estrutura, zona termicamente afetada mais estreita, maior refino dos grãos do metal de solda e diminuição nas dimensões da geometria do cordão. A penetração, por outro lado, depois de alcançar um máximo, vai diminuindo com o aumento da velocidade (MACHADO, 2007).

2.7.4 Ângulo da tocha de soldagem

O ângulo da tocha deve ser mantido em uma angulação de 10 a 20° negativo para obter uma operação simples e de fácil controle, assim como mostrado na Figura 10. Porém, este ângulo gera um cordão achatado e largo, com baixa penetração. Então, quando se necessita de um cordão com alta penetração o recomendável é utilizar um ângulo da tocha positivo (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982).

Figura 10 - Angulação da tocha de soldagem negativa e positiva, respectivamente.

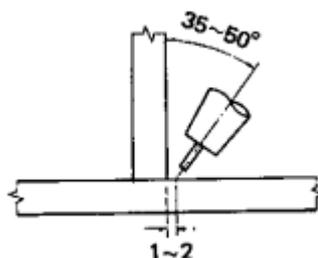


Fonte: Okumura e Taniguchi (1982).

No modo de transferência por spray o ângulo de deslocamento deve ser negativo e mantido entre 5° e 10° (MACHADO, 2007).

Nas juntas em ângulo, ou T, a tocha deve respeitar uma faixa de angulação como mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Posição recomendada da tocha para juntas de ângulo.



Fonte: Okumura e Taniguchi (1982).

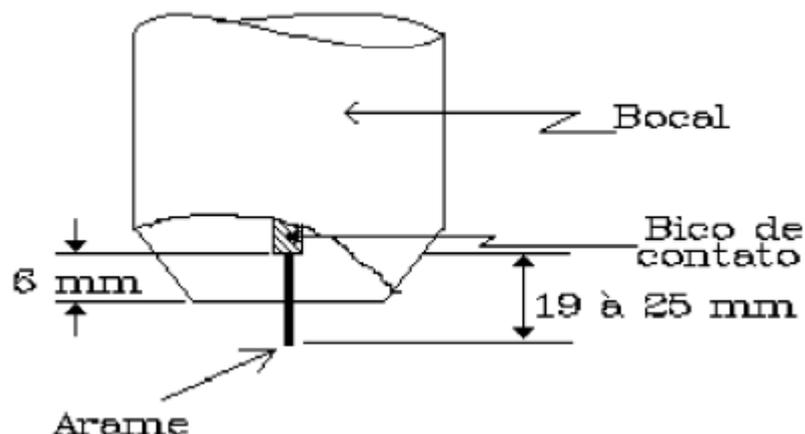
2.7.5 *Stick out*

O *stick out* pode ser definido como a extensão livre do arame de solda, compreendida entre o bico de contato e a extremidade do arame ainda não fundida (MICALLI JR, BATALHA, *et al.*, 2002).

Com o aumento dessa distancia, a resistência elétrica do eletrodo aumenta, tendo mais tempo para este ser aquecido pelo efeito Joule. Com isso, eleva-se a temperatura, e conseqüentemente, é preciso uma corrente de soldagem menor para fundir o eletrodo em uma mesma taxa de alimentação. Geralmente é utilizado *stick out* de 6 a 13mm na transferência por curto circuito e 13 a 35 para os outros modos de transferência (MICALLI JR, BATALHA, *et al.*, 2002).

No modo de transferência por spray, o *stick out* é mantido entre 19 e 25 mm, como mostrado na Figura 12 (MACHADO, 2007).

Figura 12 - *Stick out* e posição do bico de contato no modo *Spray*.



Fonte: Machado (2007).

2.7.6 Diâmetro do eletrodo (D_e)

Para eletrodos de maiores diâmetros é utilizado maiores níveis de corrente de soldagem, com isso tem-se maior penetração e taxa de fusão. Mas quando se compara dois eletrodos de diâmetros diferentes à uma mesma corrente, o eletrodo de diâmetro menor apresenta maior penetração e taxa de fusão mais alta. Porém, para eletrodos de menor diâmetro, a resposta do sistema a variações nas condições pré-estabelecidas é maior. Assim, na hora de escolher o diâmetro do arame deve-se levar em consideração alguns fatores como:

- Espessura do metal base;
- Penetração desejada;
- Taxa de deposição, a qual influencia grandemente sobre o consumo de gás;
- Posição de soldagem e geometria do cordão (MACHADO, 2007).

2.7.7 Posição do bico de contato

A posição do bico de contato no bocal varia conforme o modo de transferência. Para o modo de transferência por curto circuito a posição do bico de contato é mantido alinhado com o bocal, ou no máximo 3 mm além deste. No modo de transferência por *spray*, o bico de contato se situa recuado em relação ao bocal cerca de 6 mm, como mostrado na Figura 12 (MACHADO, 2007).

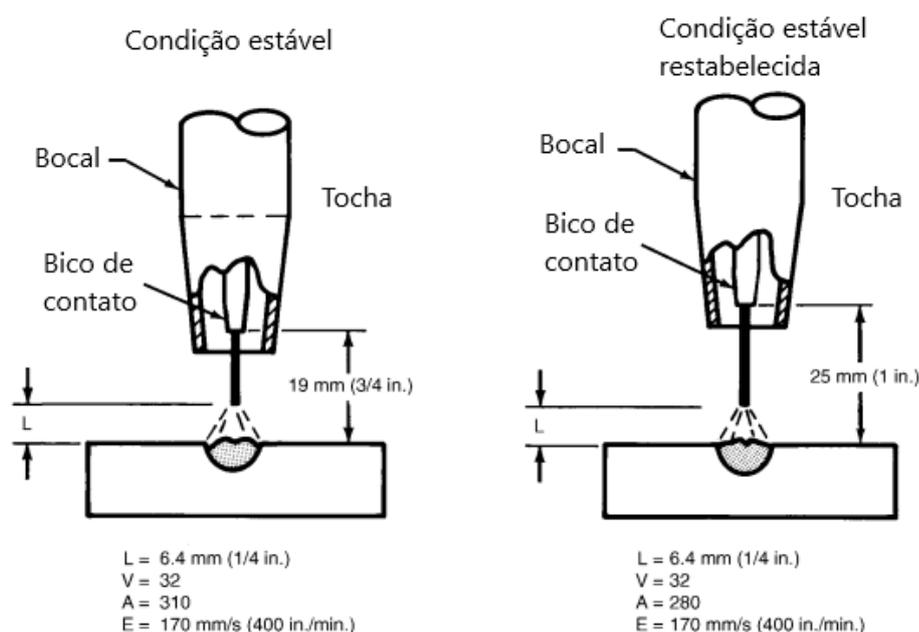
Segundo a AWS (Sociedade Americana de Soldagem, do inglês, *American Welding Society*) (2001), para a transferência por *spray*, o bico de contato é normalmente posicionado 3,2 mm (1/8 in.) recuado em relação ao bocal.

2.7.8 Distância do bocal à peça (DBP) e Distância do Bico de Contato à Peça (DBCP)

Para iniciar a formação do arco elétrico, basta apenas um toque do arame no metal base. Porém, a habilidade do soldador em manter uma distância aproximadamente constante, entre a extremidade do arame e a peça, é que irá ter maior influência na estabilidade do arco (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982)..

Um aumento na magnitude do DBCP resulta no aumento da tensão e do comprimento do arco. Porém, a corrente de soldagem diminuí com o aumento da tensão, havendo menor consumo de arame e compensando o aumento da extensão dele. De maneira contrária, a diminuição do DBCP resulta em uma tensão mais baixa, seguida do aumento da corrente e consumo do arame, compensando a diminuição da extensão do arame. Este fenômeno é uma característica de autocorreção do comprimento do arco nas fontes do tipo CV (Tensão constante, do inglês, *Constant Voltage*), o qual é ilustrado na Figura 13 (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2004).

Figura 13 - Regulação Automática do Comprimento do Arco no Processo GMAW.



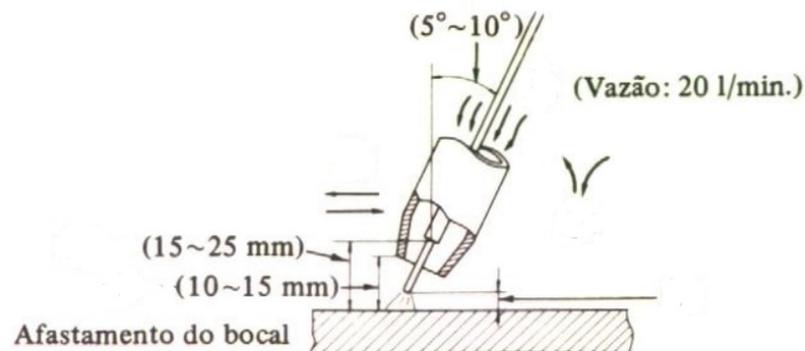
Fonte: Adaptado de *Welding Handbook Vol. 2* (2004).

Onde:

- L: Comprimento do arco;
- V: Tensão;
- A: Corrente do arco;
- E: Velocidade de alimentação do arco.

A Figura 14 apresenta os valores usuais de DBCP e DBP para o processo MAG com gás de proteção CO₂.

Figura 14 - DBCP e DBP usual na soldagem por *spray*.



Fonte: Okumura e Taniguchi (1982).

2.8 Descontinuidade e Defeito

Descontinuidade pode ser definida como uma falha na estrutura natural de um material, como falta de homogeneidade de suas características físicas, mecânicas ou metalúrgicas (AWS A3.0, 2001).

Entende-se defeito como uma falha, que por razões técnicas, leva a invalidez de um componente (ABNT 16079-1, 2012).

Desse modo, uma descontinuidade não necessariamente é um defeito, mas um defeito é uma descontinuidade mais agravante.

2.8.1 Descontinuidades comuns em solda

As descontinuidades podem ser classificadas como:

- Descontinuidades dimensionais, que envolvem: distorções, dimensões incorretas da solda e perfil incorreto da solda;

- Descontinuidades estruturais, onde as principais são: porosidades, falta de fusão, falta de penetração, mordedura, trincas, entre outras;
- Propriedades inadequadas, representadas por: propriedades mecânicas, propriedades químicas e outras (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

2.9 Descontinuidades Estruturais

São descontinuidades presentes na estrutura do cordão de solda, podem ser associadas à falta de material ou presença de algum material estranho (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

2.9.1 Porosidades

A porosidade é uma descontinuidade formada pelo aprisionamento de gás no metal de solda solidificado. Esta descontinuidade pode estar presente tanto no interior do cordão, quanto na superfície deste (*AMERICAN WELDING SOCIETY*, 2001).

2.9.2 Inclusões de escória

Em muitos processos de soldagem ocorre a formação de escória que tende a se separar do metal líquido na poça de fusão, seja devido ao fluxo de solda ou reações que se processam na poça (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

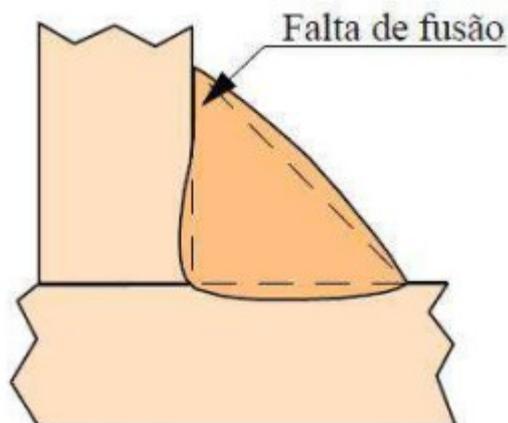
2.9.3 Falta de fusão

Esta descontinuidade ocorre quando não há fusão adequada entre o metal base e o metal de adição, ou entre os passes dos cordões, quando houver (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011).

Algumas causas desta descontinuidade são: corrente de soldagem insuficiente, manuseio inadequado do eletrodo e acesso limitado a junta soldada, limpeza insuficiente, entre outras (*AMERICAN WELDING SOCIETY*, 2001).

Uma representação da falta de fusão é mostrada na Figura 15.

Figura 15 - Representação esquemática de falta de fusão.



Fonte: Luca (2014).

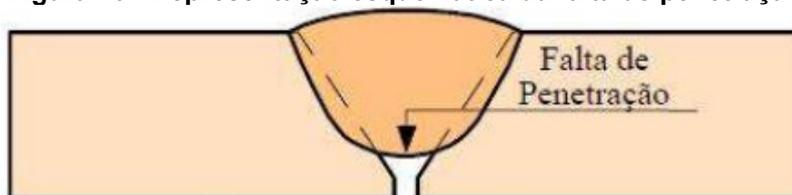
2.9.4 Falta de penetração

Descontinuidade onde o metal de solda não se estende em toda a espessura da junta soldada. Em alguns casos não há a necessidade de ocorrer penetração completa em toda a espessura da junta. Nesses casos, a penetração incompleta ocorre quando a garganta efetiva de solda é menor do que a requerida em projeto (*AMERICAN WELDING SOCIETY*, 2001).

As causas relacionadas à falta de penetração são as seguintes: manipulação incorreta do eletrodo, junta mal projetada, corrente de soldagem insuficiente, velocidade de soldagem muito alta e diâmetro de eletrodo muito grande (*MARQUES, MODENESI e BRACARENSE*, 2011).

A Figura 16 mostra uma representação deste tipo de descontinuidade.

Figura 16 - Representação esquemática da falta de penetração.



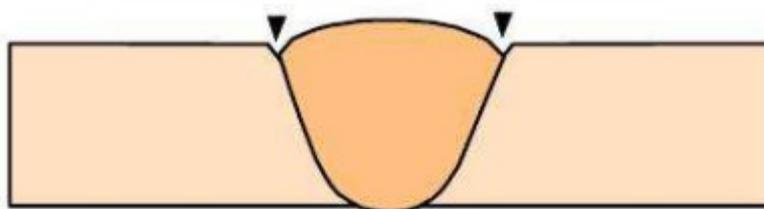
Fonte: Luca (2014).

2.9.5 Mordeduras

Ocorre na forma de entalhe na margem do cordão de solda, formando uma área com pouco preenchimento, como mostrado na Figura 17 (*AMERICAN WELDING SOCIETY*, 2001).

Algumas causas dessa descontinuidade são: manipulação incorreta do eletrodo, comprimento excessivo do arco, corrente de soldagem ou velocidade de soldagem muito elevadas (*MARQUES, MODENESI e BRACARENSE*, 2011).

Figura 17 - Representação esquemática de mordeduras.

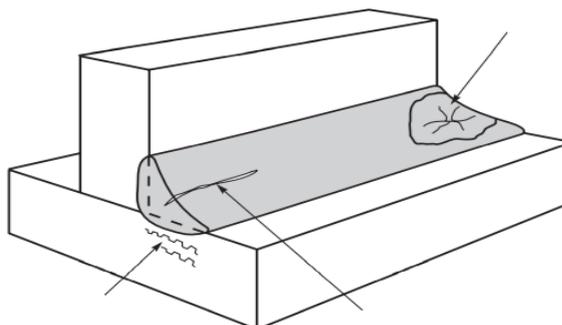


Fonte: Luca (2014).

2.9.6 Trincas

As trincas são as descontinuidades mais graves em soldagem, devido ao fato de serem grandes concentradores de tensão, possibilitando a ocorrência de fratura frágil na estrutura soldada. De maneira geral, uma trinca é resultado da incapacidade do material em suportar as solicitações impostas pelo processo de soldagem. De modo semelhante as porosidades, as trincas podem ocorrer na parte interna do cordão ou na superfície do mesmo. A Figura 18 mostra uma representação destas trincas (*MARQUES, MODENESI e BRACARENSE*, 2011).

Figura 18 - Trincas decorrentes da soldagem.



Fonte: *Welding Handbook Vol. 1* (2001).

2.10 Posições de Soldagem

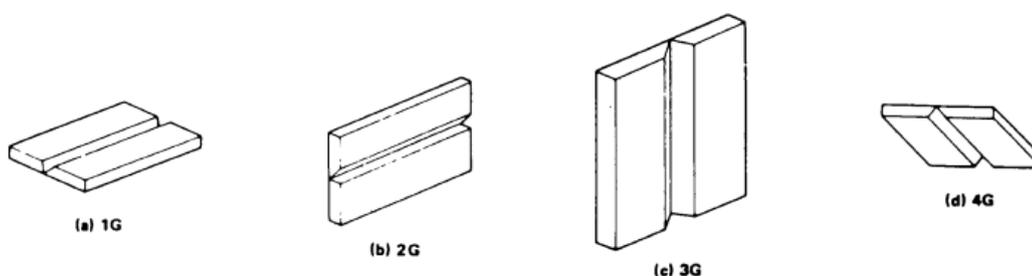
As principais posições de soldagem existentes podem ser realizadas em chapas com juntas de soldagem de topo e em ângulo. Para as juntas de topo existem 4 tipos distintos de posições de soldagem, sendo elas:

- Posição plana 1G: as chapas são posicionadas no plano horizontal e a solda feita na parte superior;
- Posição horizontal 2G: as chapas são dispostas na posição vertical e o eixo da solda na horizontal;
- Posição vertical 3G: as chapas e o eixo da solda encontram-se na posição vertical;
- Posição sobre cabeça 4G: as chapas no plano horizontal e a solda é depositada na face inferior.

A letra G (Junta, do inglês, *Groove*) é utilizada para identificar as juntas ou soldas de topo com chanfro.

A Figura 19 esquematiza estas posições (ASME IX, 1983).

Figura 19 - Posições de soldagem para juntas topo.



Fonte: ASME IX (1983).

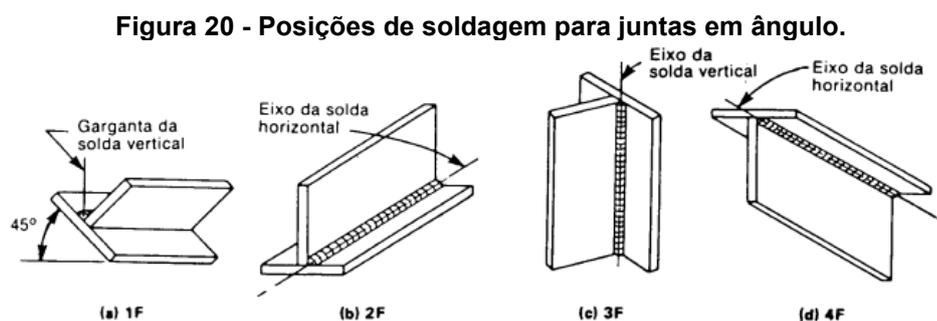
Para as chapas com junta em ângulo também existem 4 tipos de posições de soldagem, as quais são:

- Posição plana 1F: a disposição das chapas é feita de tal maneira que o eixo da solda seja horizontal e a garganta de solda seja vertical;
- Posição horizontal 2F: as chapas são posicionadas de modo que o eixo da solda seja horizontal e o metal de solda seja depositado sobre a face superior de uma delas e a face vertical da outra;
- Posição vertical 3F: e posição das chapas é feita de maneira que o eixo da solda depositada seja vertical;

- Posição vertical 4F: as chapas são posicionadas de modo que o eixo da solda seja horizontal e o metal de solda seja depositado sobre a face inferior de uma delas e a face vertical da outra.

A letra F (Filete, do inglês, *Fillet*) é utilizada para identificar as juntas ou soldas de filete ou de ângulo.

A Figura 20 mostra a representação destas posições (ASME IX, 1983).



2.11 Orientação do Eletrodo/Arame

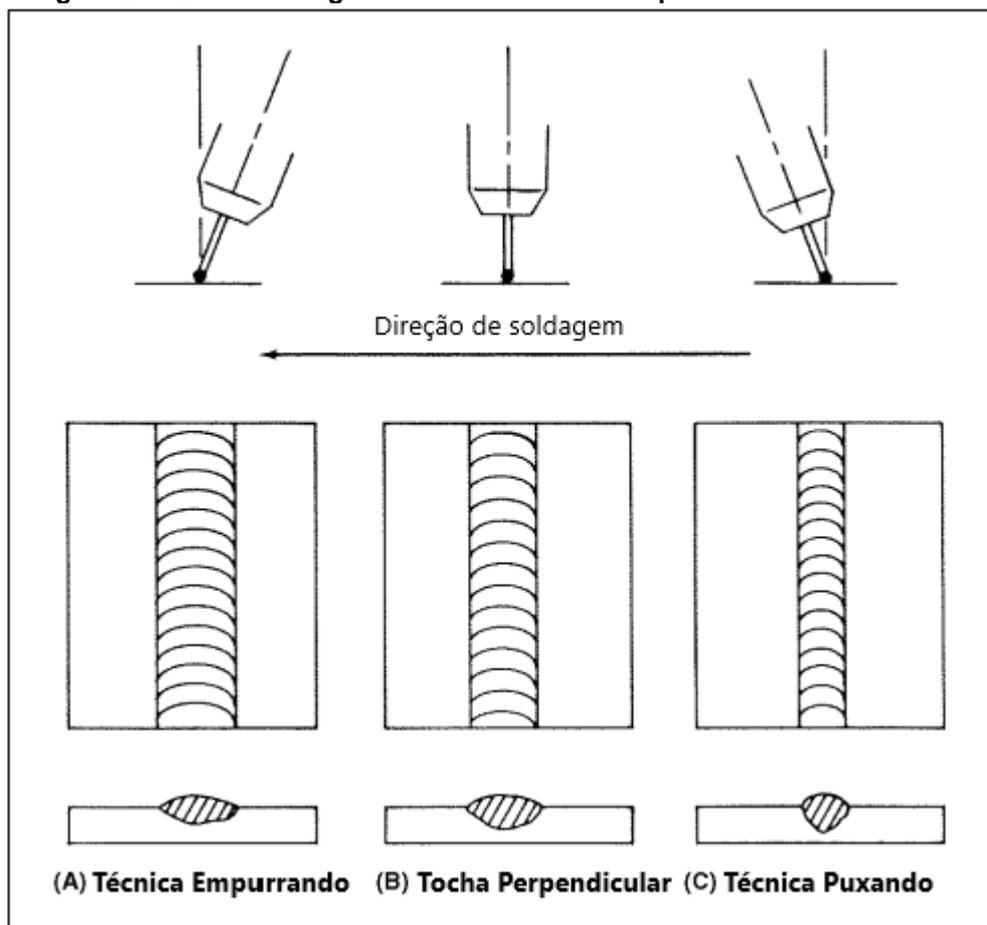
A orientação do eletrodo de soldagem, em relação à junta de solda, afeta a forma e a penetração do cordão de solda em um nível maior do que a tensão do arco ou a velocidade de deslocamento. Existem dois modos de orientação do eletrodo:

- Com base no ângulo de deslocamento: é o ângulo entre o eixo do eletrodo com a direção de deslocamento;
- Com base no ângulo de trabalho: é o ângulo entre o eixo do eletrodo com a superfície da peça (*AMERICAN WELDING SOCIETY, 2004*).

A Figura 21 ilustra o efeito da orientação do eletrodo na largura e na penetração da solda. A técnica de soldagem empurrando ocorre quando o eletrodo aponta na direção do deslocamento. Já a técnica de soldagem puxando ocorre quando o eletrodo aponta no sentido oposto da direção de deslocamento (*AMERICAN WELDING SOCIETY, 2004*).

Na técnica de soldagem empurrando, o cordão apresenta perfil mais largo e com menor penetração. A máxima penetração é obtida na técnica puxando e com um ângulo de 25° com a perpendicular (*AMERICAN WELDING SOCIETY, 2004*).

Figura 21 - Efeito do ângulo de deslocamento no perfil do cordão soldado.



Fonte: *American Welding Society* (2004).

2.12 Métodos de Aplicação dos Processos de Soldagem

A classificação dos métodos de aplicação dos processos de soldagem, ocorre com base no nível de envolvimento do operador na execução das operações de soldagem (*AMERICAN WELDING SOCIETY, 2001*).

2.12.1 Soldagem Manual

Na soldagem manual, todas as operações relacionadas com execução e controle contínuo da soldagem são executadas pelo soldador (*AMERICAN WELDING SOCIETY, 2001*).

2.12.2 Soldagem Semiautomática

Na soldagem semiautomática o equipamento controla uma ou mais condições de soldagem. Geralmente neste modo, a alimentação do arame de soldagem é realizada de modo automático pelo equipamento, enquanto o soldador manipula a pistola de soldagem durante o processo (*AMERICAN WELDING SOCIETY, 2001*).

2.12.3 Soldagem Mecanizada

Neste modo de soldagem, a tocha do equipamento é fixada em um tipo de dispositivo mecânico, e o soldador é responsável por ajustar os controles do equipamento e observar a operação de soldagem (*AMERICAN WELDING SOCIETY, 2001*).

2.12.4 Soldagem Automatizada

A soldagem automatizada se caracteriza pelo fato de não precisar que o soldador fique observando o processo, ou observe apenas ocasionalmente. Ademais, não precisa de nenhum ajuste manual dos controles do equipamento, o soldador apenas ativa a máquina para que esta inicie o ciclo de soldagem e observe as soldas ocasionalmente (*AMERICAN WELDING SOCIETY, 2001*).

2.12.5 Soldagem Robótica

Neste modo de soldagem o operador não participa de nenhuma etapa da realização e controle do processo de soldagem. Pois são equipamentos robóticos que realizam e controlam a soldagem. Porém, o operador tem o papel de realizar o controle de qualidade e identificação de descontinuidades na solda, tanto na soldagem robótica, quanto na soldagem automatizada (*AMERICAN WELDING SOCIETY, 2001*).

2.12.6 Soldagem por Controle Adaptativo

A soldagem por controle adaptativo ocorre sem a intervenção ou controle do operador. Pois neste modo, o equipamento utiliza de sensores para fornecer dados

em tempo real para o computador controlador. Assim, o próprio sistema realiza mudanças nas condições de soldagem e direciona o equipamento para tomar as medidas apropriadas (*AMERICAN WELDING SOCIETY, 2001*).

A Figura 22 resume as capacidades dos diferentes métodos de aplicação de soldagem.

Figura 22 - Métodos de aplicação dos processos de soldagem.

Método de aplicação	Manual	Semiautomático	Mecanizado	Automatizado	Robotizado	Controle adaptativo
Elementos/Funções do processo de soldagem						
Começar e manter o arco	Pessoa	Máquina	Máquina	Máquina	Máquina (com sensor)	Máquina (robô)
Alimenta o eletrodo no processo	Pessoa	Máquina	Máquina	Máquina	Máquina	Máquina
Controla o arco para penetrações adequadas	Pessoa	Pessoa	Máquina	Máquina	Máquina (com sensor)	Máquina (robô) (apenas com sensor)
Move o arco ao longo da articulação (caminho)	Pessoa	Pessoa	Máquina	Máquina	Máquina (com sensor)	Máquina (robô)
Guia o arco ao longo da junta	Pessoa	Pessoa	Pessoa	Máquina por meio de caminho pré-arranjado	Máquina (com sensor)	Máquina (robô) (apenas com sensor)
Manipula a tocha para direcionar o arco	Pessoa	Pessoa	Pessoa	Máquina	Máquina (com sensor)	Máquina (robô)
Corrige o arco para superar desvios	Pessoa	Pessoa	Pessoa	Não corrige; possíveis imperfeições	Máquina (com sensor)	Máquina (robô) (apenas com sensor)

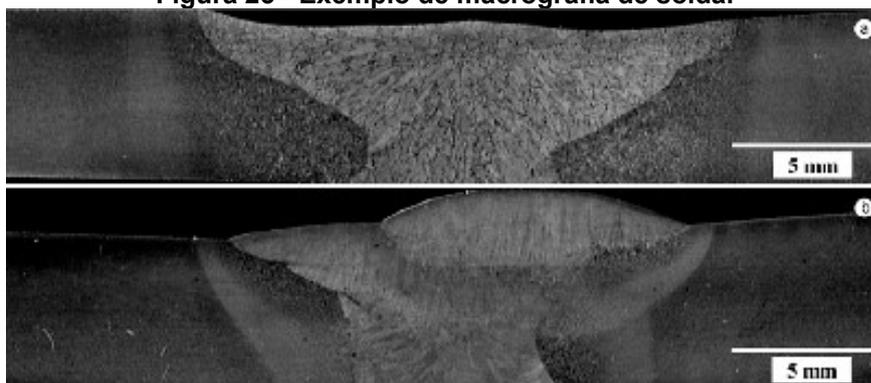
Fonte: *American Welding Society (2001)*.

2.13 Exame Macrográfico

O exame macrográfico consiste em analisar uma superfície plana, após esta ser devidamente lixada, polida e atacada quimicamente com uma substância que reage com a mesma, para verificar detalhes macrográficos da estrutura do material ou da junta soldada (Ensaio Macrográfico - Infosolda, 2018).

A Figura 23 apresenta um exemplo de macrografia feita em uma junta soldada.

Figura 23 - Exemplo de macrografia de solda.



Fonte: Marconi, Castillo, et al. (2015).

O preparo dos corpos de prova para realizar a macrografia consiste nas seguintes etapas: 1) Escolher e localizar a seção de estudo; 2) Preparar uma superfície plana e polida na seção escolhida; 3) Atacar a superfície com reagente químico adequado (COLPAERT, 1974).

Nas juntas soldadas, o corte da seção transversal serve para avaliar algumas características macroestruturais, tais como a extensão da zona termicamente afetada, zona de fusão, possíveis descontinuidades ou defeitos, etc. (COLPAERT, 1974).

A preparação da superfície para o exame macrográfico consiste no corte ou desbaste, e polimento da mesma. Para realizar o corte, pode ser utilizado uma serra ou cortador de disco abrasivo. Em alguns casos o corte é substituído pelo desbaste por usinagem. Nesta etapa do processo deve-se tomar cuidado para evitar o encruamento da superfície, e o aquecimento da mesma a mais de 100 °C (COLPAERT, 1974).

A rugosidade desejada na superfície a qual será realizada a macrografia, estará sujeita ao ataque que será executado, e quais detalhes que se pretende observar. O polimento da superfície onde se deseja fazer o ataque é realizado com lixa, o qual resulta do atrito entre a superfície e a lixa. Geralmente é realizado o polimento com lixas 100 ou 120, 220 e 320 respectivamente ao mudar de uma lixa para outra, muda-se a direção do polimento em 90°, até que os riscos da lixa anterior desapareçam por completo. Não se deve realizar o polimento da superfície até um acabamento excessivamente fino, pois pode dificultar o ataque devido ao reagente não molhar corretamente a superfície. Ademais, pode dificultar na hora de fotografar a amostra devido a reflexos prejudiciais (COLPAERT, 1974).

Após o polimento é realizada a lavagem e secagem da superfície polida. A lavagem é realizada sob aplicação de água corrente sobre a superfície polida. Na etapa de secagem, aplica-se álcool sobre a superfície polida, seguido de jato de ar (Ensaio Macrográfico - Infosolda, 2018).

Segundo Colpaert (1974), o ataque na superfície polida pode ser realizado de três modos:

- Ataque por imersão: é realizada mergulhando a superfície polida em um recipiente onde contém o reagente;
- Ataque por aplicação: o reagente é aplicado sobre a superfície polida com a utilização de um pincel ou chumaço de algodão;
- Impressão direta de Baumann: aplica-se uma folha de papel fotográfico umedecida com reagente sobre a superfície polida. Neste processo é obtido um decalque da distribuição dos sulfetos no aço.

Normalmente os reagentes utilizados para o ataque químico são soluções ácidas, alcalinas ou substâncias complexas dissolvidas em água ou álcool. Os reagentes mais comuns são o ácido clorídrico ou ácido muriático, reativo de iodo, reativo de persulfato de amônio e reativo nital (Ensaio Macrográfico - Infosolda, 2018).

2.14 Especificações de Procedimentos de Soldagem - EPS

A EPS (Especificação do Procedimento de Soldagem, do inglês, *Welding Procedure Specification – WPS*) pode ser descrita como: um documento que fornece as variáveis de soldagem necessárias para uma aplicação específica com a finalidade de garantir a repetibilidade do processo por soldadores e operadores de soldagem devidamente treinados (*AMERICAN WELDING SOCIETY*, 2001).

Segundo a ASME IX (*American Society Of Mechanical Engineers*) (1983), “Uma EPS é um procedimento de soldagem, escrito e qualificado, preparado para fornecer instruções referentes à execução de soldas de produção que estejam de acordo com os requisitos do código.”

De maneira geral, uma EPS é um documento que relata como uma solda deve ser realizada, contendo os parâmetros recomendados para determinadas operações de soldagem a fim de auxiliar no planejamento e controle de qualidade da operação de soldagem (GIMENES, 2018).

O objetivo geral de uma EPS é determinar se a solda que será empregada em determinada estrutura irá atender as propriedades exigidas da mesma em uma aplicação específica. Em suma, a EPS relaciona as variáveis essenciais e não essenciais e seus limites aceitos quando esta for empregada, além de servir como uma orientação para o soldador (ASME IX, 1983).

Existem dois tipos de EPS normalmente utilizados. O primeiro tipo é empregado a todas as soldas de um tipo específico de metal base, ou grupo de metais base, utilizando procedimentos amplos e gerais. Este tipo de EPS se caracteriza por ser mais flexível, uma vez que pode ser empregado na soldagem de diferentes metais base e com diferentes metais de adição, dentro dos limites do código de soldagem utilizado em sua preparação (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2001).

O segundo tipo de EPS corresponde à procedimentos mais precisos. Este tipo descreve a soldagem de apenas um tamanho e tipo de junta em um metal base específico. Essas especificações de procedimentos são normalmente utilizadas para controlar as operações de soldagem de projeto em um tipo específico de metal base e metal de adição (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2001).

A EPS também pode ser utilizada por compradores que necessitam de produtos com propriedades químicas ou mecânicas específicas. Neste caso, o comprador especifica as propriedades desejadas na soldagem segundo um código ou especificação. Em consequência disso, o fabricante do produto desenvolve uma EPS que resultará nos resultados especificados pelo comprador (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2001).

Organizações como a AWS (Sociedade Americana de Soldagem, do inglês, *American Welding Society*) divulgam normas para procedimentos de soldagem. Porém, é importante salientar que as EPS's não substituem códigos de fabricação, normas, ou especificações de como um produto deve ser fabricado. De outro modo, estas EPS's servem como um guia para a produção de soldas utilizando uma lista detalhada de variáveis (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2001).

Também pode ser exigido que o empregador prepare e qualifique a EPS, como ocorre em alguns códigos e normas. Algumas destas normas não são específicas quanto ao conteúdo da EPS. Elas podem listar variáveis específicas a serem apresentadas e detalhar quais são variáveis de qualificação. Alguns códigos apenas identificam as variáveis de soldagem que podem afetar a qualificação do

procedimento. Neste caso, o usuário do código determina quais outras variáveis e informações precisam ser incluídas na EPS (*AMERICAN WELDING SOCIETY*, 2001).

Na EPS deve estar contido todas as variáveis de soldagem que podem interferir nas propriedades mecânicas da solda ou requisitos de qualidade. Entre estas variáveis, estão inclusos o processo de soldagem, técnica e posição de soldagem, metal base, geometria da junta, metal de adição, temperaturas de pré-aquecimento e interpasse, corrente de soldagem, tensão do arco, gás de proteção ou vazão, e tratamento térmico pós soldagem. Todas as indicações contidas na EPS devem ser seguidas e devem ser suficientemente detalhadas para garantir que a soldagem satisfaça os requisitos do código ou norma aplicável (*AMERICAN WELDING SOCIETY*, 2001).

Em alguns códigos de soldagem é permitido o uso de procedimentos de soldagem conjunta. No Código de Soldagem Estrutural – Aço D1.1 da AWS existe uma cláusula que permite a realização de EPS's pré-qualificadas. As EPS's formuladas segundo esta cláusula do código, seguindo os requisitos especificados por ele, podem ser isentas da realização de testes de qualificação. Vale ressaltar que os requisitos específicos do código devem ser entregues ao soldador no momento da qualificação do procedimento de soldagem (do inglês, *Welding Procedure Qualification – WPQ*) (*AMERICAN WELDING SOCIETY*, 2001).

Quaisquer alterações nas especificações do código anulam a conjuntura da EPS de ser pré-qualificada, fazendo-se necessário a qualificação mediante testes. Assim como a utilização destes procedimentos pré-qualificados ou qualificados não asseguram soldas de qualidade, nem a capacidade dos soldadores executarem o procedimento de forma correta. A qualidade das soldas produzidas pode ser averiguada a partir de ensaios não destrutivos, realizados durante e após a soldagem. Alguns dos modos de examinar as juntas soldadas são: inspeção visual, partículas magnéticas, líquido penetrante, ultrassônico e testes radiográficos (*AMERICAN WELDING SOCIETY*, 2001).

No presente trabalho será seguida a cláusula 5 da norma D1.1/D1.1M de 2020 da AWS Código de Soldagem estrutural - Aço (*Structural Welding Code – Steel*), a qual contém requisitos para Especificações de Procedimento de Soldagem pré-qualificadas. As EPS's desenvolvidas de acordo com esta cláusula estão isentas dos testes requeridos na cláusula 6 para qualificação da EPS.

2.14.1 Cláusula 5 – Pré-qualificação de EPS's – AWS D1.1 (2020)

A cláusula 5 da norma AWS D1.1 (2020) é dividida em 8 partes, as quais são:

1. Parte A: Desenvolvimento da EPS;
2. Parte B: Metal base;
3. Parte C: Juntas soldadas;
4. Parte D: Processo de soldagem;
5. Parte E: Metal de adição e Gás de soldagem;
6. Parte F: Requisitos de temperatura de pré-aquecimento e interpasse;
7. Parte G: Requisitos da EPS;
8. Parte H: Tratamento térmico pós soldagem.

Para a EPS poder ser denominada como pré-qualificada ela deve estar em conformidade com todos requisitos contidos na Cláusula 5. As EPS's pré-qualificadas são isentas da necessidade de testes de qualificação e devem ser escritas (*AMERICAN WELDING SOCIETY, 2020*).

2.14.1.1 Parte A: Desenvolvimento da EPS

Para EPS's pré-qualificadas, os requisitos da Tabela 3 devem ser atendidos.

Tabela 3 - Requisitos para EPS pré-qualificada.

(Continua)			
Variável	Posição	Tipo de solda	GMAW/FCAW
Diâmetro máximo do eletrodo	Plana	Filete	1/8 in (3,2mm)
		Chanfro	
		Passe de raiz	
	Horizontal	Filete	1/8 in (3,2mm)
		Chanfro	
	Vertical	Todos	3/32 in (2,4mm)
Sobre cabeça	Todos	5/64 in (2,0mm)	
Corrente máxima	Todas as posições	Filete	Dentro da gama de operações indicadas pelo fabricante do metal de adição
		Passe de raiz de solda em chanfro com abertura	
		Passe de raiz de solda em chanfro sem abertura	
		Passes de enchimento de solda em chanfro	
		Passe de acabamento de solda em chanfro	
Espessura máxima do passe de raiz	Plana	Todos	3/8 in (10mm)
	Horizontal		5/16 in (8mm)

Tabela 3 - Requisitos para EPS pré-qualificada.

			(Conclusão)
Espessura máxima do passe de raiz	Vertical	Todos	1/2 in (12,7mm)
	Sobre cabeça		5/16 in (8mm)
Espessura máxima do passe de enchimento	Plana	Todos	1/4 in (6,35mm)
	Horizontal		
	Vertical		
	Sobre cabeça		
Tamanho máximo de solda de filete em passe único	Plana	Filete	1/2 in (12,7mm)
	Horizontal		3/8 in (10mm)
	Vertical		1/2 in (12,7mm)
	Sobre cabeça		5/16 in (8mm)
Largura máxima de camada em passe único	Todas (para GMAW/FCAW) F & H (para SAW)	Abertura de raiz > 1/2 in (12,7mm)	Camadas divididas
		Qualquer camada de largura W	O processo GMAW-S não deve ser pré-qualificado
Largura máxima de camada em passe único	Todas (para GMAW/FCAW) F & H (para SAW)	Abertura de raiz > 1/2 in (12,7mm)	Camadas divididas
		Qualquer camada de largura W	Ver nota a.

- a. Para arames não tubulares, nas posições plana, horizontal ou sobre cabeça, dividir as camadas quando a largura da camada for maior que 5/8in (15,875mm). Na posição vertical para não tubulares ou posições plana, horizontal, vertical e sobre cabeça para tubulares, fazer a divisão em camadas quando a largura da camada for maior que 1in (25,7mm).**

Fonte: Adaptado de AWS D1.1 (2020).

A EPS escrita pode seguir qualquer formato que for conveniente. Dois exemplos de EPS's são apresentados no Anexo A e Anexo B, sugeridos pela AWS e pela ASME, respectivamente.

As variáveis de soldagem apresentadas na Tabela 4 devem ser especificados na EPS. As variáveis que apresentarem uma certa faixa de operação devem ser utilizadas respeitando os valores contidos dentro desta faixa especificada pela EPS (*AMERICAN WELDING SOCIETY, 2020*).

Tabela 4 - Variáveis essenciais para EPS pré-qualificada.

Variáveis que devem estar incluídas na EPS pré-qualificada
1 – Processo de soldagem
2 – Posição de soldagem
3 – Número do grupo de metal base
4 – Categoria de pré-aquecimento do metal base (quando houver)
5 – Classificação do metal de adição (SMAW, GMAW, FCAW)
6 – Diâmetro nominal do eletrodo
7 – Corrente (SAW, FCAW, GMAW)
8 – Tensão (SAW, FCAW, GMAW)
9 – Modo de transferência (GMAW)
10 – Tipo de corrente (CA ou CC)
11 – Polaridade da corrente (CA, CCEN, CCEP)
12 – Velocidade de alimentação do arame (SAW, FCAW, GMAW)
13 – Velocidade de soldagem
14 – Composição nominal do gás de proteção (FCAW-G, GMAW)
15 – Vazão de gás de proteção (FCAW-G, GMAW)
16 – Tipo de solda (Filete, CJP, PJP, Plug, Slot)
17 – Detalhes da soldagem do chanfro
18 – Tratamento térmico pós soldagem (quando houver)

Fonte: Adaptado de AWS D1.1 (2020).

A Tabela 5 mostra quais destas variáveis podem ter alterações em seus valores e qual a faixa destas tolerâncias. Para mudanças maiores que a faixa especificada na Tabela 5 para estas variáveis irá requerer que se faça uma nova pré-qualificação ou revisão na EPS existente, ou poderá até ser exigida uma EPS qualificada por teste de acordo com a Cláusula 6 da norma AWS D1.1/D1.1M de 2020 (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2020).

Tabela 5 - Tolerâncias das variáveis essenciais.

Tolerância de variável para EPS pré-qualificada	
Variável	Tolerância permitida
22 – Corrente (SAW, FCAW, GMAW)	+ ou – 10%
23 – Tensão (SAW, FCAW, GMAW)	+ ou – 15%
24 – Vel. De alimentação do arame (se não for controlada pela amperagem) (SAW, FCAW, GMAW)	+ ou – 10%
25 – Velocidade de soldagem (SAW, FCAW, GMAW)	+ ou – 25%
26 – Vazão de gás de proteção (FCAW-G, GMAW)	> 50% se aumentar ou > 25% se diminuir

Fonte: Adaptado de AWS D1.1 (2020).

2.14.1.2 Parte B: Metal base

Segundo a AWS D1.1/D1.1M (2020) somente os metais listados na Cláusula 5 da norma podem ser utilizados na EPS pré-qualificada. Para metais não listados, podem ser utilizados materiais com composição química que se enquadram na faixa de composição química de algum material listado na tabela, desde que aprovado pelo engenheiro. Assim, a Tabela 6 contém alguns dos metais base aprovados pela AWS para serem utilizados no desenvolvimento das EPS.

Tabela 6 - Exemplos de materiais aprovados para aplicação em EPS's pré-qualificadas.

Alguns metais aprovados para EPS pré-qualificada

Grupo	Especificações do aço		Limite mínimo de elasticidade		Faixa de tensão	
			ksi	MPa	ksi	Mpa
I	ASTM A36	≤ 3/4 in (20mm)	36	250	58-80	400-550
I	ASTM A1018	Grau 30	30	205	49 min	340 min
II	ASTM A572	Grau 42	42	290	60 min	415 min

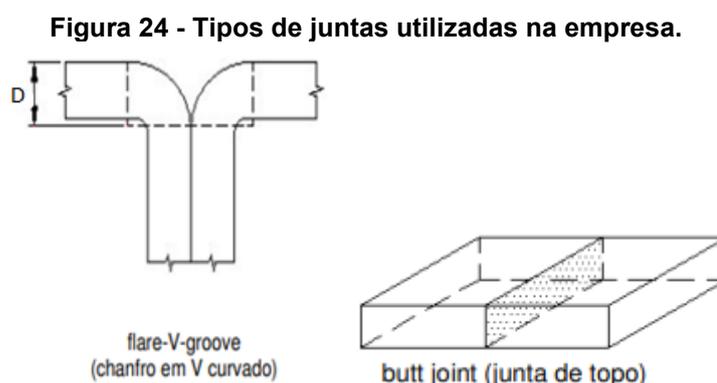
Fonte: Adaptado de AWS D1.1 (2020).

Segundo a AWS B.1/B2.1M (2014) os metais base e metais de adição foram agrupados em categorias para minimizar a quantidade de testes de qualificação requeridos, além de proporcionar facilidade de referência ao determinar em qual grupo um metal base se enquadra. O metal base utilizado se enquadra no grupo II da AWS D1.1.

2.14.1.3 Parte C: Juntas soldadas

Existem dois tipos de juntas soldadas: CJP (*Complete Joint Penetration* – Junta com Penetração Completa), que ocorre quando a solda tem penetração completa, ou seja, quando a penetração atinge toda a espessura da junta, e PJP (*Partial Joint Penetration* – Junta com Penetração Parcial) que ocorre quando não há penetração em toda a espessura do metal base. Ambas devem estar em conformidade com a cláusula 5.4 da AWS D1.1/D1.1M de 2020 e com as representações e tolerâncias indicadas por ela (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2020).

A Figura 24 apresenta a esquematização de uma junta topo normal e uma junta de topo com chanfro em V curvado, as quais estão representadas de acordo com a norma AWS A2.4 *Standard Symbols for Welding, Brazing and Nondestructive Examination* (do inglês, Norma de Símbolos para Soldagem, Brasagem e Exame não Destrutivo).



Fonte: AWS A2.4 (2020).

A Tabela 7 apresenta a junta de topo com chanfro em V curvado, a qual é do tipo PJP (Junta com Penetração Parcial). Também estão detalhadas as tolerâncias que devem ser seguidas para realizar a soldagem sem que haja necessidade de realizar testes de qualificação (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2020).

Tabela 7 - Junta topo com chanfro em V curvado PJP pré-qualificada.

Solda de chanfro em V curvado (Flare-V-groove weld) - Junta de topo									
Processo de soldagem	Denominação da junta	Espessura do metal base (U-ilimitado)		Preparação da junta			Posições de soldagem permitidas	Tamanho de solda (S)	Notas
		T ₁	T ₂	Abertura de raiz Face de raiz Raio de curvatura	Tolerâncias				
					Como detalhado	Como ajustado			
GMAW FCAW-G	B-P11-GF	5 min	T ₁ min	R = 0 f = 5 min $\frac{3T_1}{2} \text{ min}$	+2, -0 +U, -0 +U, -0	+2, -0 +U, -0 +U, -0	Todas	5/8 r	a, j, l, m, n

a: não pré-qualificado para GMAW-S (MIG/MAG com transferência por curto circuito) ou GTAW (soldagem a arco elétrico em eletrodo de tungstênio, do inglês, Gas Tungsten Arc Welding). O modo de transferência metálica utilizado para soldar os corpos de prova é o *spray*, o qual está de acordo com a norma;

j: a orientação dos dois membros nas juntas pode variar de 135° a 180° para juntas de topo, ou 45° a 135° para juntas de canto, ou 45° a 90° para juntas T. Estes ângulos se referem às faces dos componentes da junta nas quais é depositada a solda. Neste trabalho, o ângulo entre as faces da junta de topo é 180°, e está de acordo com a norma;

l: o tamanho de solda S deve ser baseado em juntas soldadas onde suas faces estejam niveladas;

m: para soldas com chanfro em V curvado e chanfro em bisel curvado em seções tubulares retangulares, r deve ser duas vezes a espessura da parede. Esta nota não se aplica a junta em estudo, pois se aplica somente a perfis retangulares fechados e a junta em estudo é um perfil aberto.

n: para soldas com chanfro em V curvado e superfícies com valores diferentes de r, o menor r deve ser usado. Quando o raio de curvatura das partes da junta são diferentes, utilizar o valor do menor raio para o cálculo do tamanho s.

Fonte: Adaptado de AWS D1.1 (2020).

A Tabela 8 apresenta o significado das siglas e abreviações contidos na Tabela 7.

Tabela 8 - Legenda para a Tabela 7.**(Continua)**

Símbolos para tipos de juntas	Processo de soldagem
B (<i>Butt</i>) - junta de topo	SMAW
C (<i>corner</i>) - junta de ângulo	GMAW
T - Junta em T	FCAW
BC (<i>Butt; corner</i>) - topo ou ângulo	SAW
TC (<i>T; corner</i>) - T ou de ângulo	
BTC (<i>Butt; T; Corner</i>) - topo, em T ou de ângulo	
Símbolos para espessura e penetração do metal base	Posições de soldagem
P - PJP	F (<i>flat</i>) - plana
L - Espessura limitada - CJP	H (<i>horizontal</i>) - horizontal
u - Espessura ilimitada - CJP	V (<i>vertical</i>) - vertical
	OH (<i>overhead</i>) - sobre cabeça

Tabela 8 - Legenda para a Tabela 7.

(Conclusão)	
Símbolos para tipo de solda	Dimensões
1 - Chanfro quadrado	R = abertura de raiz
2 - Chanfro em V simples	α, β = ângulo de abertura do chanfro
3 - Chanfro em X	f = face de raiz
4 - Chanfro em bisel simples	r = raio de chanfro em meio J ou em U
5 - Chanfro em bisel duplo	D, D ₁ , D ₂ = solda em chanfro PJP - profundidade de chanfro
6 - Chanfro em U	
7 - Chanfro em duplo U	s, s ₁ , s ₂ = solda em chanfro PJP - tamanhos correspondentes de s, s ₁ , s ₂
8 - Chanfro em meio J	
9 - Chanfro em duplo J	
10 - Chanfro em bisel curvado	
11 - Chanfro em V curvado	
Símbolo correspondente ao processo, se não for SMAW	Designação das juntas
G – GMAW	As letras minúsculas, por exemplo a, b, c, são usadas para diferenciar juntas que teriam a mesma designação.
F – FCAW	
S – SAW	

Fonte: Adaptado de AWS D1.1 (2020).

Os processos de soldagem que podem seguir as especificações da Tabela 7 para uma EPS pré-qualificada são o GMAW, mais conhecido como MIG/MAG, e o FCAW-G que é a soldagem com arame tubular e proteção gasosa (do inglês, Gas Shielded Flux Cored Arc Welding) (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2020).

A sigla B-P11-GF, que denomina a junta da Tabela 7, é traduzida, de acordo com a Tabela 8, conforme:

B: é a letra que representa uma junta de topo, butt em inglês;

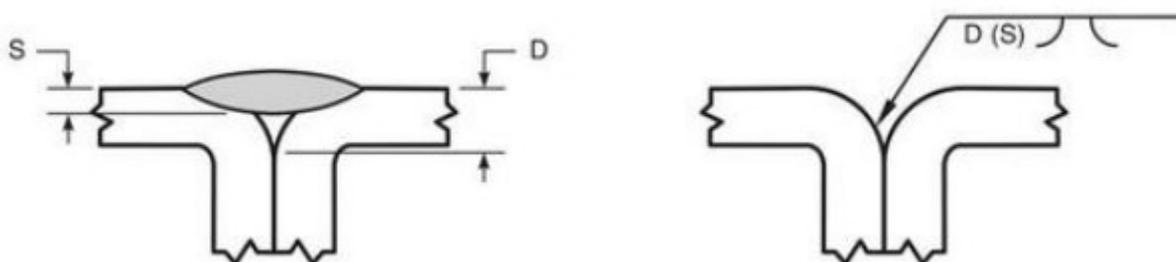
P: significa que a solda a ser realizada na junta é de penetração parcial (partial joint penetration);

11: é o número de identificação para o tipo de solda/chanfro, ou seja, chanfro em V curvado;

GF: representam o processo de soldagem que pode ser utilizado para a execução da soldagem, onde G representa o processo GMAW e F o processo FCAW. A Figura 25 ilustra as dimensões S e D referentes a seção de solda e utilização correta da simbologia das mesmas, onde:

- s: tamanho da solda em chanfro, ou penetração da solda;
- D: distância do ponto de tangência ao topo do membro.

Figura 25 - Aplicação e simbologia da junta topo com chanfro em V curvado.



Fonte: AWS 2.4 (2020).

A coluna denominada “Como detalhado” (Tabela 7) mostra as tolerâncias admissíveis para os valores de R, f e r, sendo que U significa “*unlimited*”, ou seja, não há limite de valor acima do especificado (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2020).

2.14.1.4 Parte D: Processo de soldagem

Os processos de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (do inglês, *Shielded Metal Arc Welding – SMAW*), por arco submerso (SAW, do inglês, *Submerged Arc Welding*), com arame tubular (FCAW, do inglês, *Flux Cored Arc Welding*) e com proteção gasosa (GMAW, do inglês, *Gas Metal Arc Welding*), exceto GMAW com transferência metálica por curto circuito, são processos considerados pré-qualificados pela norma AWS D1.1/1.1M de 2020 (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2020).

Em EPS's pré-qualificadas os processos GMAW e FCAW devem ser feitos utilizando fontes de alimentação do tipo tensão constante (CV, do inglês, *Constant Voltage*). Além disso, para o processo GMAW, utilizando o modo de transferência por curto circuito, é exigida a qualificação da EPS. Já o modo de transferência por *spray* é qualificado para a utilização em EPS's pré-qualificadas (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2020).

2.14.1.4.1 Fontes de Soldagem

As fontes de soldagem utilizadas são de dois tipos diferentes: retificadoras e inversoras. As fontes de soldagem da marca ESAB são do tipo retificadoras e os modelos utilizados são o ESAB 408 e 408 *TopFlex*, as quais se diferenciam pelo fato do modelo 408 *TopFlex* ter o alimentador de arame separado da carenagem principal da fonte. A Tabela 9 apresenta as especificações técnicas dos equipamentos ESAB.

Tabela 9 - Especificações técnicas da fonte de alimentação ESAB.

Fonte de energia	ESAB Smashweld® 408/408TF		
Tipo	Retificador		
Tensão da rede	220V - 3 $\Phi/\pm 10\%$	380V - 3 $\Phi/\pm 10\%$	440V - 3 $\Phi/\pm 10\%$
Faixa de corrente/tensão GMAW	50A/17V-400A/34V		
Tensão de circuito aberto	18-45V		
Alimentador de arame			
Faixa de velocidade do arame (m/min)	OrigoFeed	Smashweld 318/408	
	1,5 - 22,0	1,5 - 19,0	
Faixa de diâmetro de arame (mm)	Tipo do arame		408/TopFlex
	Sólido		0,60 - 1,60
	Alumínio		0,80 - 1,60
	Tubular		0,90 - 1,60

Fonte: Adaptado de ESAB (2016).

Os modelos Sumig *Falcon* 402, 502 e 505 utilizam fontes inversoras. As especificações técnicas dessas fontes estão contidas na Tabela 10 e Tabela 11.

Tabela 10 - Especificações técnicas das fontes SUMIG Falcon 402 e 502.

Dados Técnicos SUMIG	
Fonte de energia	Falcon 402
Tipo	Inversora
Alimentação / Fases (V-Ph)	AC380V $\pm 15\%$ ~ 50/60Hz
Corrente de regulagem	10 a 400A
Diâmetro do arame	0,8 a 1,2mm
Velocidade de alimentação do arame	1,5 a 24 m/min
Dados Técnicos SUMIG	
Fonte de energia	Falcon 502
Tipo	Inversora
Alimentação / Fases (V-Ph)	AC 220/380V $\pm 15\%$ ~ 50/60Hz
Corrente de regulagem	10 a 500A
Diâmetro do arame	0,8 a 1,6mm
Velocidade de alimentação do arame	1,5 a 24 m/min

Fonte: Adaptado de SUMIG (2020).

Tabela 11 - Especificações técnicas da fonte SUMIG Falcon 505.

Dados Técnicos SUMIG	
Fonte de energia	Falcon 505
Tipo	Inversora
Alimentação / Fases (V-Ph)	AC 220/380/440V $\pm 15\%$ ~ 50/60Hz
Faixa de corrente de saída (A)	20-500 20-450
Faixa de tensão de saída (V)	15-39
Diâmetro do arame	1,0; 1,2; 1,6mm

Fonte: Adaptado de SUMIG (2021).

As fontes utilizadas na soldagem da junta em estudo são SUMIG 402, 502 e 505 que são do tipo inversora e trabalham com corrente contínua, e também a fonte retificadora ESAB 408. Estas fontes atendem ao requisito da norma a qual exige que, para os processos GMAW e FCAW, devem utilizar tensão constante. Isso porque estas fontes recebem energia na forma de tensão e corrente alternada, transformam em tensão constante e fornecem corrente contínua (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2020).

2.14.1.5 Parte E: Metal de adição e Gás de proteção

Como visto anteriormente na Tabela 6, o metal base utilizado pertence ao Grupo II dos metais considerados pré-qualificados para a utilização em EPS's pré-qualificadas, o qual é um aço carbono. De acordo com a norma AWS D1.1, o metal de adição ER70S-X é qualificado para realizar a soldagem deste metal base (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2020).

O arame ER70S-X é classificado de acordo com a norma AWS A 5.18.

A nomenclatura ER70S-6 é traduzida da seguinte forma:

- ER: designa o uso como eletrodo ou vareta (do inglês, *electrode ou rod*);
- XX (70): indica em incrementos de 1000 psi, a resistência à tração mínima do metal de solda produzido pelo eletrodo quando testado de acordo com a especificação 5.18;
- Y (S): indica se o material de adição é sólido (maciço) (S) ou composto (tubular) (C);
- X (6): indica a composição química de um eletrodo sólido ou a composição química do metal de solda produzido por um eletrodo composto.

O gás de proteção é designado de acordo com a norma AWS A5.32/5.32M de 1997 que classifica os gases para soldagem da seguinte forma:

- SG – B XYZ – %%, onde:
- SG (Gás de proteção, do inglês, *Shielding gas*): as letras SG no começo de cada designação identifica o componente como gás de proteção;
- B XYZ: a letra B logo após o prefixo SG indica o gás principal da mistura ou gás único;

- B XYZ: as letras XYZ identificam o segundo, terceiro e quarto (quando houver) gases da mistura em ordem decrescente da quantidade;
- %%%: os números subsequentes indicam a quantidade em porcentagem dos gases XYZ respectivamente.

Na Tabela 12 são mostradas as opções de gases de proteção para a soldagem com o arame ER70S-6 (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2020).

Tabela 12 - Relação de arame e gás de soldagem.

Opções de gás de proteção para EPS pré-qualificada para eletrodos GMAW conforme AWS A5.18/A5.18M

Eletrodo	Gás de proteção	Composição
ER70S-X (exceto ER70S-G) e E70C-X eletrodo com núcleo de metal	Combinações de Ar/CO ₂	Ar 75-90%/CO ₂ 10-25%
	Combinações de Ar/O ₂	Ar 95-98%/CO ₂ 2-5%
	100% CO ₂	100% CO ₂

Fonte: AWS D1.1 (2020).

2.14.1.6 Parte F: Requisitos de temperatura de pré-aquecimento e interpasse

As temperaturas mínimas de pré-aquecimento e interpasse devem ser utilizadas de acordo com a Tabela 13 (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2020).

Tabela 13: Temperatura mínima pré-qualificada de pré-aquecimento e interpasse.

Temperatura mínima de pré-aquecimento e interpasse.

Especificação do aço	Processo de soldagem	Espessura da peça mais espessa no ponto de soldagem		Mínima temperatura de pré-aquecimento e interpasse	
		in	mm	°F	°C
ASTM A36	SMAW com eletrodos de baixo hidrogênio, SAW, GMAW, FCAW	1/8 a 3/4	3 a 20	32 ^a	0 ^a
ASTM A500 Grades A, B, C					
ASTM A572 Grades 42, 50, 52					

- a. Quando a temperatura do metal base estiver abaixo de 32°F [0°C], o metal base deve ser pré-aquecido a um mínimo de 70°F [20°C] e o interpasse mínimo temperatura deve ser mantida durante a soldagem.

Fonte: AWS D1.1 (2020).

2.14.1.7 Parte G: Requisitos da EPS

A Tabela 3 lista os requisitos e limitações das variáveis da EPS por posição, tipo de solda e processo (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2020).

2.14.1.8 Parte H: Tratamento térmico pós soldagem

O tratamento térmico pós-soldagem deve ser pré-qualificado, desde que seja aprovado pelo Engenheiro e as seguintes condições sejam atendidas:

- O limite de escoamento mínimo especificado do metal base não deve exceder 50 ksi [345 MPa];
- O metal base não deve ser fabricado por têmpera e revenimento (Q&T), têmpera e auto-revenimento (Q&ST), processamento controlado termomecânico (TMCP) ou onde o trabalho a frio é usado para alcançar maior resistência nas propriedades mecânica (por exemplo, certos graus de tubulação ASTM A500);
- Não deve haver requisitos para teste de resistência ao entalhe do metal base, HAZ ou metal de solda;
- Deve haver dados disponíveis demonstrando que o metal de solda deve ter resistência e ductilidade adequadas na condição de tratamento térmico pós-soldagem (por exemplo, conforme pode ser encontrado na especificação e classificação relevante do metal de adição AWS A5.X ou na fabricante de metal de adição).

Em peças muito grandes, onde o tratamento térmico pós soldagem é impraticável, pode-se evitar esta etapa, desde que aprovado pelo engenheiro (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2020).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para melhor entendimento de como foi desenvolvido o presente trabalho, serão apresentados a seguir os materiais, tais como o metal base, arame, gás, tipo de junta, e os métodos, desde a coleta e execução dos procedimentos, até a formulação/descrição da EPS, utilizados no decorrer deste.

3.1 Metal base

O material base utilizado no processo é o aço estrutural CIVIL 300, o qual é equivalente ao ASTM A572 grau 42 apresentado na Tabela 6 e as outras marcas comerciais como mostrado na Tabela 14.

Tabela 14 - Equivalência entre marcas comerciais e normas.

Marcas Comerciais			Normas			
V&M do Brasil AS	COSIPA	USIMINAS	ASTM	EN	NBR	MERCOSUL
VMB 300	COSCIVIL 300	USI-CIVIL 300	ASTM A572 GR 42	----	----	----
VMB 350	COSCIVIL 350	USI-CIVIL 350	ASTM A572 GR 50	EN-10025-S355JO EN-10025-S355JR	NBR 5000-G35 NBR 5004-Q40 NBR 7007 AR350	NM02-102-MCF-345 NM02-101-MCG-360

Fonte: Adaptado de GMF Montagens.

As propriedades mecânicas do metal base (ASTM A572 GR42) testadas pelo fornecedor estão mostradas na Tabela 15. Os dados das amostras 1 e 2 foram testados e fornecidos pela Perfyço Metais LTDA, e as amostras 3 e 4 pela Arcelormittal Brasil S.A.

Tabela 15 - Propriedades mecânicas certificadas pelo fornecedor.

Propriedades mecânicas			
Amostra	Limite de elasticidade (MPa)	Limite de ruptura (MPa)	Alongamento (%)
1	321	447	29
2	331	457	31
3	326	449	30
4	389	511	18

Fonte: Perfyço Metais LTDA e Arcerlomittal Brasil S.A (2021).

Juntamente com as propriedades mecânicas, foram obtidas com os fornecedores as composições químicas das amostras apresentadas na Tabela 15. A Tabela 16 apresenta as composições químicas das amostras 1, 2, 3 e 4 respectivamente.

Tabela 16 - Análise química do metal base disponibilizado pelo fornecedor.

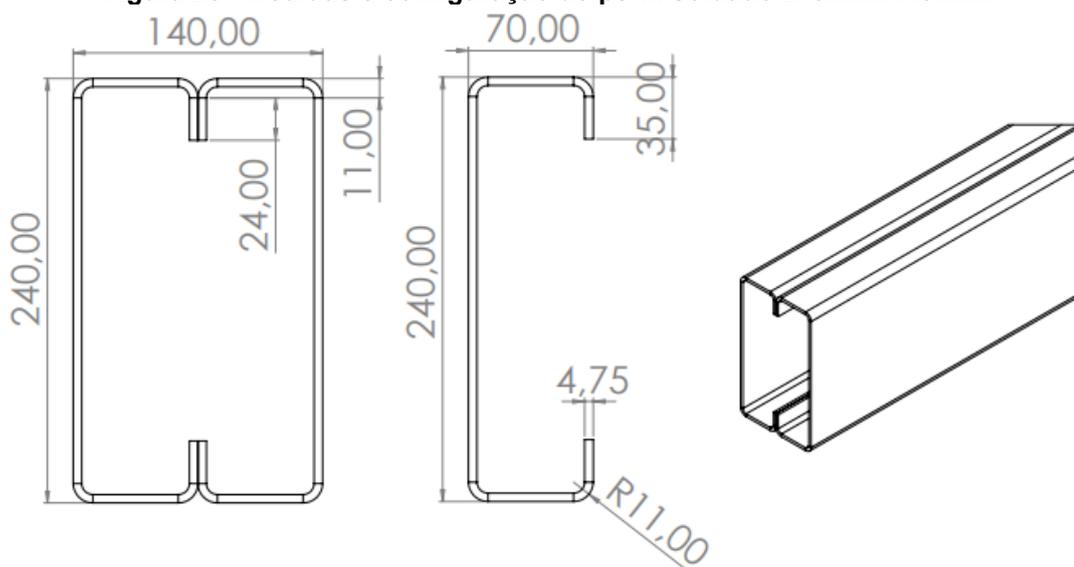
Análise Química (%)																
C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Sn	Al	N	Nb	V	Ti	B	Ca
0,17	0,68	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,17	0,71	0,00	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,15	0,76	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,19	0,72	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Perfyço Metais LTDA e Arcelormittal Brasil S.A (2021).

3.1.1 Juntas Soldadas

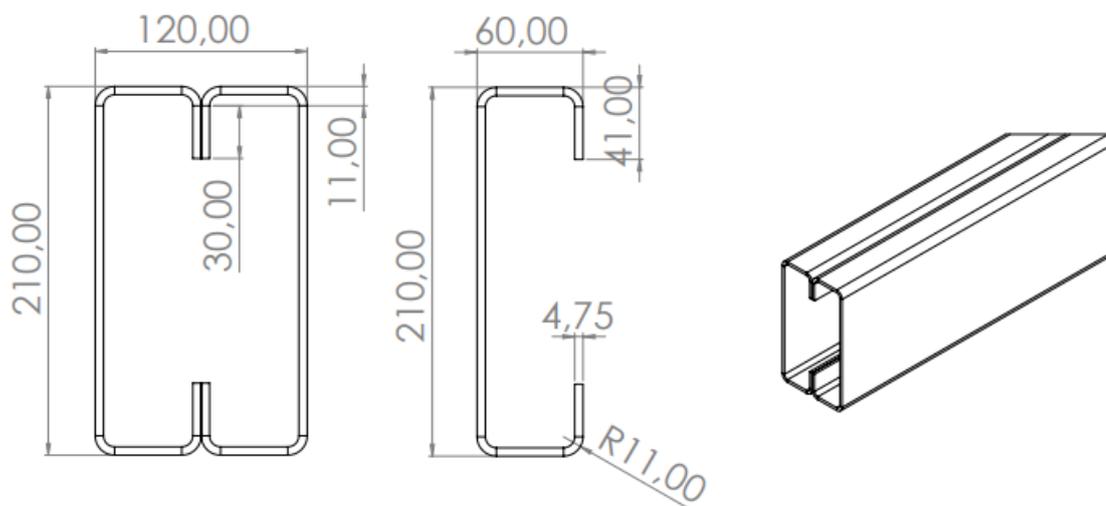
O componente de estudo deste trabalho é constituído de dois perfis “U” enrijecidos, os quais compõem o chassi de um dos implementos fabricados pela empresa na qual foi desenvolvido o presente estudo. A junção destes perfis forma uma junta de topo com chanfro em V curvado, como mostrado na Figura 26 e Figura 27. Este tipo de junta é classificada como PJP.

Figura 26 - Medidas e configuração do perfil soldado 240mmx140mm.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 27 - Medidas e configuração do perfil soldado 210mmx120mm.



Fonte: Autoria própria (2022).

A Figura 28 apresenta a representação da seção transversal da junta soldada.

Figura 28 - Representação transversal da junta e o cordão soldado.



Fonte: Autoria própria (2022).

Na coluna de preparação da junta (Tabela 7) tem-se que a abertura de raiz R deve ser igual a zero, a face (f) de raiz de no mínimo 5 mm e o raio de curvatura (r) igual a três vezes a espessura do metal base dividido por dois. Assim, como o metal base tem espessura de 4,75 mm o valor mínimo do raio de curvatura teria que ser de 7,125 mm, e o raio das componentes da junta em estudo é igual a 11 mm. O tamanho de solda S deve ser no mínimo 5/8" do valor de r, ou seja 6,875 mm.

3.2 Consumíveis

Os consumíveis envolvidos no processo MIG/MAG são o arame e gás de soldagem.

O arame utilizado é o ER70S-6 de diâmetro 1.0 mm. A composição química do arame ER70S-6 é mostrada na Tabela 17.

Tabela 17 - Composição química do arame de solda.

ELEMENTOS	C	Si	Mn	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo	V
%MÍN	0,06	0,8	1,4	-	-	-	-	-	-	-
%MÁX	0,15	1,15	1,85	0,035	0,025	0,5	0,15	0,15	0,15	0,03

Fonte: Adaptado de Arames para Solda GERDAU (2022).

O gás de proteção utilizado é designado como SG-AC-10, pois se trata de uma mistura de argônio e CO₂, de 90% de Ar e 10% de CO₂, classificada como gás ativo devido à presença de CO₂ que é um gás oxidante, e mesmo em baixas quantidades na mistura já a classifica como gás ativo.

3.3 Coleta de Dados

Primeiramente foram coletados dados referentes aos parâmetros de soldagem, tipos de juntas, espessuras dos materiais e posições de soldagem atualmente utilizados no processo de soldagem.

Os parâmetros de soldagem foram coletados durante a realização de soldas teste. Os componentes soldados dentro da empresa foram observados para identificar quais os tipos de juntas utilizados. A junta de topo com chanfro em V curvado foi escolhida devido ao fato de seu metal base ser qualificado perante a norma, ou seja, não necessita realizar testes para comprovação das propriedades mecânicas e químicas.

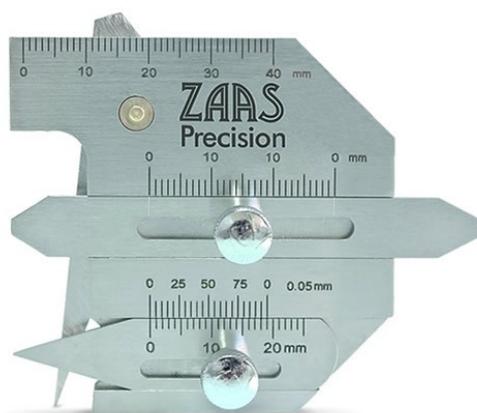
Para medir o comprimento, largura e altura dos perfis a serem soldados (Figura 26 e Figura 27) foi utilizado uma trena métrica de 7,5 m da marca Vonder.

Para obter a espessura do material e dimensões do cordão soldado foi utilizado um paquímetro DIGIMESS de 150 mm com precisão de 0,05 mm. Também foi utilizado um calibre de solda tipo 3 ZAAS Precision (Figura 29) o qual pode ser utilizado para fazer as seguintes medições:

- Espessura da peça a ser medida: até 40mm;
- Perna de solda: até 18mm;
- Garganta de Solda: até 15mm;
- Reforço da face da solda: até 12mm;
- Largura do cordão da solda: até 40mm;
- Abertura de raiz: até 5mm;

- Angulo do Bisel: até 60°;
- Profundidade de mordedura: 0 a 25mm.

Figura 29 - Calibre de solda ZAAS Precision.



Fonte: Amatoools (2022).

Para a determinação do raio de curvatura do perfil foi utilizado um calibre de raio, mostrado na Figura 30.

Figura 30 - Calibre de raio.



Fonte: Autoria própria (2022).

Os dados de tensão e corrente de soldagem foram coletados por meio da observação do painel eletrônico de cada máquina durante a soldagem de corpos de prova teste.

Algumas das máquinas de solda não possuem mostradores de velocidade de arame. Estas realizam a autorregulagem deste parâmetro com base na corrente de soldagem utilizada. Desta forma, para que a velocidade de arame fosse obtida, foi utilizado um método prático, no qual foi acionado o gatilho da tocha para que o alimentador realizasse a tração do arame, deixando que este fosse movido para fora

da tocha durante um determinado período de tempo. Assim, o intervalo de tempo e o comprimento do arame foram determinados e com isso foram utilizados para calcular a velocidade de alimentação do arame.

A vazão do gás de soldagem foi observada diretamente no regulador de pressão instalado na máquina. Porém, também foi feita a medição utilizando um bibímetro, ou fluxômetro, Figura 31, que mede a vazão diretamente no bocal da tocha de soldagem. Este fluxômetro possui duas escalas de medição que indicam a vazão para os gases Ar e CO₂ puros. Apenas os fluxômetros contidos em alguns reguladores de pressão possuem escala para a mistura de Ar e CO₂.

Entretanto, para vazões de até 25-30 L/min aproximadamente, os valores da escala de Ar puro e da mistura Ar + CO₂ são muito próximos. Assim, os valores medidos com o fluxômetro da Figura 31 foram considerados como corretos.

Figura 31 - Medidor de vazão (fluxômetro/bibímetro).



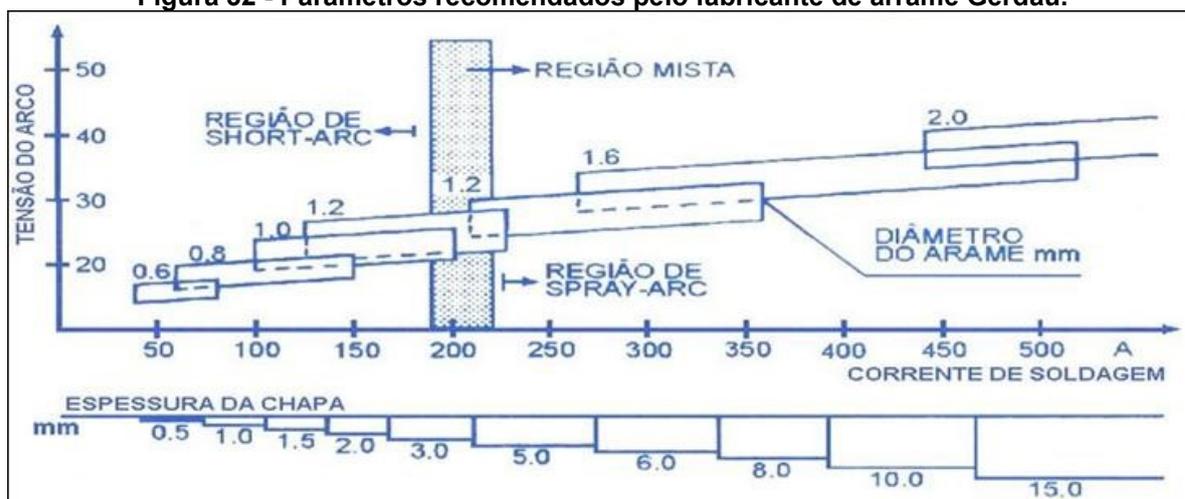
Fonte: Carbografite (2020).

3.4 Definição dos parâmetros

O segundo passo foi especificar os parâmetros corretos (corrente, tensão, tipo e vazão de gás, etc.) para cada processo de acordo com a norma AWS D1.1 *Structural Welding Code – Steel* (Código de Soldagem Estrutural – Aço), levando em consideração o material base e de adição, o gás de proteção e o tipo de junta.

Conforme a Tabela 3 é recomendável utilizar a faixa de corrente de soldagem indicada pelo fabricante do arame de soldagem, podendo apresentar tolerâncias como as indicadas na Tabela 5. A Figura 32 mostra os parâmetros recomendados pela Gerdau.

Figura 32 - Parâmetros recomendados pelo fabricante de arame Gerdau.



Fonte: GERDAU (2022).

Porém, para a elaboração da EPS pré-qualificada para a junta em estudo não pode ser utilizado o modo de transferência por curto circuito, pois, como é especificado na Nota a da Tabela 7, este modo de transferência não é qualificado.

Na Figura 32 podemos ver que é possível trabalhar no modo spray com arame de 1.2 mm em uma faixa de corrente entre 230 a 360 A e de tensão entre 24 a 32 V aproximadamente. Para valores menores de diâmetro do arame podemos trabalhar em faixas mais baixas de corrente e tensão.

Entretanto, os parâmetros obtidos com os fornecedores do metal de adição geralmente são para o modo de transferência por curto circuito. Além de serem recomendados para a utilização com gases de proteção diferentes do utilizado (90% Ar + 10% CO₂). Devido a isso, os parâmetros foram ajustados com base em testes, fazendo a soldagem de corpos de prova de mesmo material e tipo de junta utilizado na empresa.

Após os testes realizados com os parâmetros utilizados pelos soldadores, foram feitos testes variando a corrente e tensão de soldagem. O objetivo principal foi de identificar as faixas de corrente e tensão onde ocorre a transição do modo de transferência metálica por curto circuito, passando pelo modo globular, para o modo de transferência por *spray*. Ademais, para identificar a partir de quais valores de corrente e tensão de soldagem é possível obter o modo de transferência por *spray*.

O método utilizado para identificar o modo de transferência, foi a visualização da variação de corrente e tensão durante a soldagem. O modo de transferência por curto circuito apresenta variações constantes na corrente e tensão de soldagem como

mostrado na Figura 8. Já o modo de transferência por *spray* se caracteriza pelo fato de a corrente e a tensão apresentarem valores aproximadamente constantes durante o processo, como mostrado na Figura 9.

Outro método utilizado para identificar o modo de transferência foi por meio do ruído emitido durante a soldagem. Pois cada modo apresenta um ruído característico, no modo por curto circuito é um ruído estridente, com estalos, e no modo *spray* é caracterizado por um chiado.

Assim, foram obtidos os parâmetros para realizar a soldagem no modo de transferência por *spray*, os quais serão apresentados mais adiante.

3.5 Análise dos corpos de prova soldados

Depois de realizar a soldagem dos corpos de prova, eles foram cortados em três partes aproximadamente iguais utilizando uma serra fita horizontal, como a mostrada na Figura 33.

Figura 33 - Serra fita horizontal.



Fonte: Autoria própria (2022).

Em seguida, o tamanho de solda s foi medido para conferir se está de acordo com a norma. Também foi medido a distância do ponto de tangência da junta até o topo da mesma. Ambas as medidas foram obtidas utilizando um paquímetro.

Posteriormente foi realizada a análise visual da qualidade das soldas e a quantidade de respingos gerados durante o processo de soldagem.

3.5.1 Macrografia

Para uma melhor visualização da penetração e da área afetada pela solda foi feito um ataque com reagente químico nas peças com o reagente Nital 10%.

Inicialmente foi feito o polimento da seção transversal da solda onde foram feitos os cortes com a serra fita. Para lixar as amostras foi utilizado lixas com tamanhos de grão 80, 220 e 600 respectivamente. As superfícies polidas foram lavadas sob água corrente e, imediatamente após isso, foi aplicado álcool etílico sob a superfície para que ajudasse na remoção da humidade gerada pela água. Para realizar a secagem da superfície foi utilizado jato de ar quente.

O segundo passo foi realizar o ataque da superfície com o Nital 10%. A aplicação do Nital ocorreu por meio do gotejamento do mesmo sobre a superfície. Após a aplicação do Nital, foi deixado que ele reagisse com a superfície atacada por cerca de 15 a 20 segundos. Após isso, a superfície foi novamente submetida a aplicação de água corrente, álcool etílico e secagem com jato de ar, respectivamente.

O último passo foi realizar a inspeção visual das superfícies atacadas para visualizar a penetração e largura do cordão de solda. Além de verificar a existência, ou não, de defeitos.

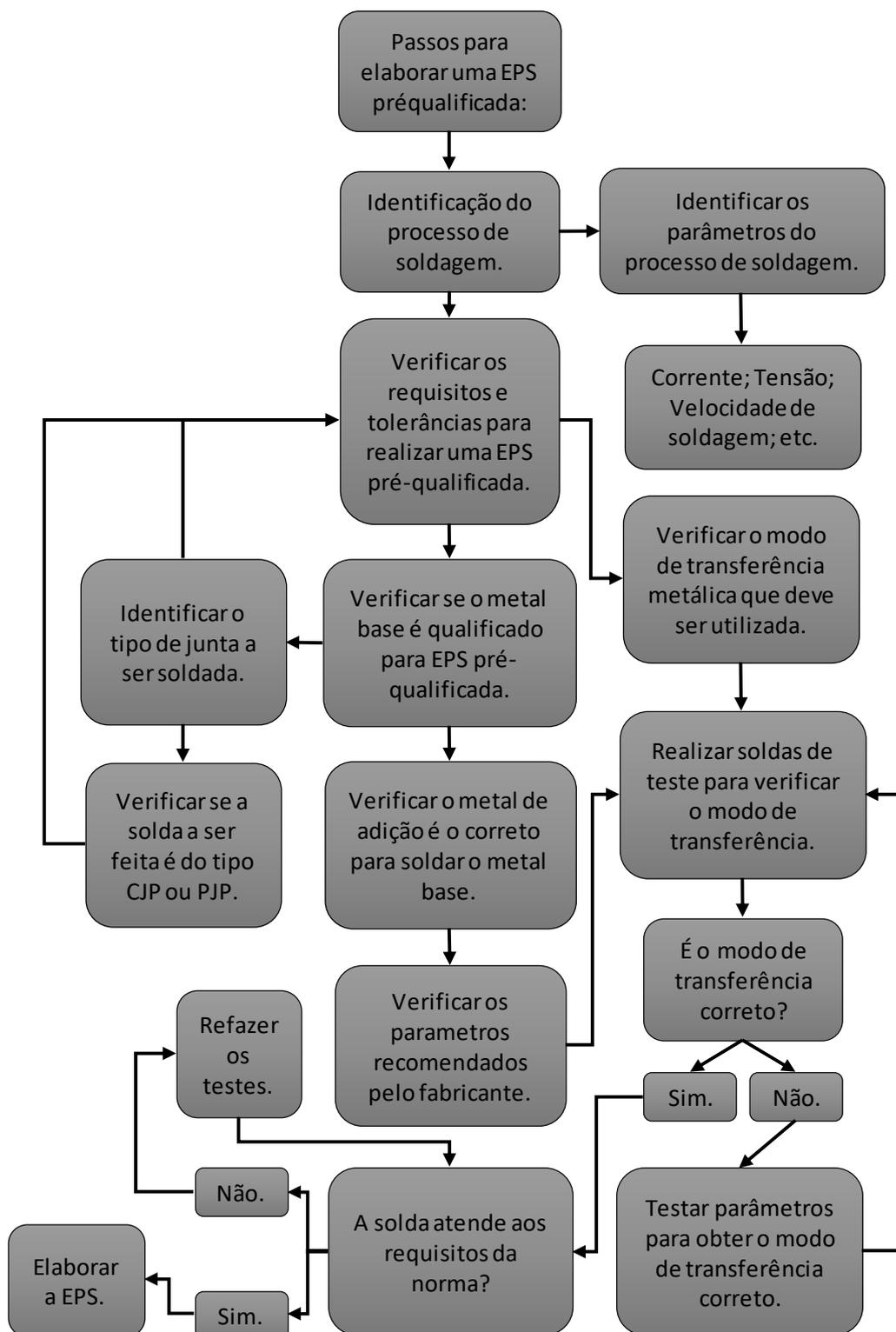
3.6 Conteúdo da EPS

A EPS é identificada por um número, data de desenvolvimento, nome do responsável pela EPS, o processo de soldagem e o tipo de execução (se é manual, semiautomática, mecanizada, automatizada ou robótica). Além disso, a EPS escrita pode seguir qualquer formato conveniente, um exemplo de EPS utilizado pela AWS pode ser vista no ANEXO A.

Também está contido na EPS as informações de projeto e execução da estrutura soldada, tais como: material base da estrutura, tipo de junta, material de adição, tratamento térmico antes ou após a soldagem (quando houver), parâmetros do processo e técnica de operação.

A Figura 34 apresenta um fluxograma com a sequência para a elaboração de uma EPS pré-qualificada.

Figura 34 - Fluxograma para elaboração de EPS pré-qualificada.



Fonte: Autoria própria (2022).

A partir do fluxograma da Figura 34 pode ser observado que em todo o processo da elaboração e desenvolvimento da EPS é necessário verificar se os resultados obtidos estão de acordo com a norma a qual está sendo utilizada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 18 são apresentados os parâmetros atualmente utilizados no processo de soldagem obtidos por meio da coleta de dados realizada na empresa.

Tabela 18 - Parâmetros utilizados atualmente no processo de soldagem MAG pela empresa.

Máquina	Operador	Amostra	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de alimentação (m/min)	Diâmetro do arame (mm)	Vazão de gás (L/min)	Sentido de soldagem
ESAB <i>Smashweld</i> 318	Paulo	1	26.4	236	11	1.0	14	Puxando
SUMIG <i>Falcon</i> 505	Thiago	2	25.5	211	10,3	1.0	18	Empurrando
ESAB 408 <i>TopFlex</i>	José	3	26.0	196	18	1.0	17	Empurrando
SUMIG <i>Falcon</i> 402	Ademar	4	27.5	246	12	1.0	15	Empurrando
ESAB 408 <i>TopFlex</i>	José	5	29,2	234	18	1.0	25	Empurrando
ESAB 408 <i>TopFlex</i>	José	6	29,2	232	18	1.0	25	Empurrando
SUMIG <i>Falcon</i> 502 (tartaruga)	José	7	27,7	291	6	1.0	17	Empurrando
SUMIG <i>Falcon</i> 502 (tartaruga)	José	8	27,7	291	6	1.0	17	Empurrando
SUMIG <i>Falcon</i> 402	Ademar	9	28,2	244	11,8	1.0	15	Empurrando
SUMIG <i>Falcon</i> 402	Ademar	10	28,2	249	12	1.0	15	Empurrando
SUMIG <i>Falcon</i> 505	Charles	11	26,7	217	14	1.0	15	Empurrando
SUMIG <i>Falcon</i> 505	Charles	12	26,7	227	14	1.0	15	Empurrando

Fonte: Autoria própria (2022).

Pode-se notar a falta de padrão dos parâmetros utilizados pelos soldadores, principalmente na corrente de soldagem, que é a base de regulagem dos restantes dos parâmetros. A vazão de gás, que usualmente é utilizada na faixa de 15 a 20 L/min, também apresenta alguns valores fora desta faixa, como nas amostras 5 e 6. Além disso, o modo de transferência o qual está sendo utilizado é o curto circuito. As amostras cujos parâmetros estão apresentados na Tabela 18 resultaram nos seguintes valores dispostos na Tabela 19.

Tabela 19 - Valores medidos nas amostras de 1 à 12.

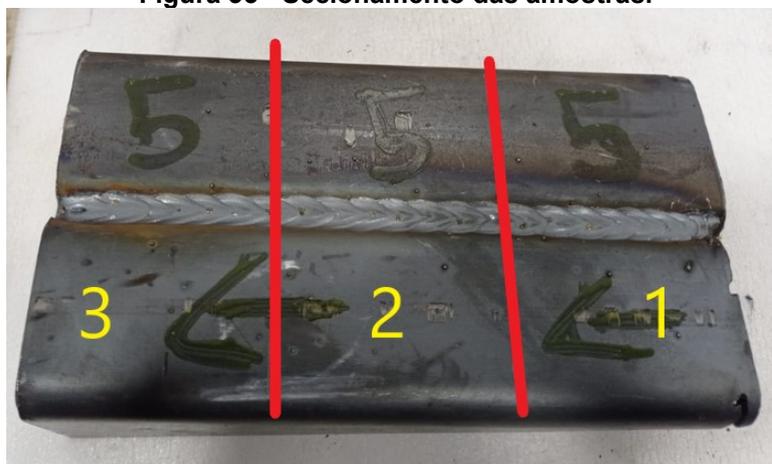
Amostra	Abertura de raiz (R)(mm)	Face de raiz (f)(mm)	Raio de curvatura (r)(mm)	Tamanho de solda (s)(mm)			
				Seção 1-2	Seção 2-1	Seção 2-3	Seção 3-2
1	0	30	11	7,9	7,8	7,15	7,0
2	0	30	11	6,3	8,0	7,3	6,9
3	0	30	11	7,7	7,8	9,0	8,3
4	0	30	11	8,0	6,2	6,5	7,9
5	0	30	11	7,92	9,22	10,6	10,1
6	0	30	11	8,24	9,96	7,0	6,52
7	0	30	11	7,66	7,4	7,6	7,72
8	0	30	11	7,64	7,7	7,36	7,46
9	0	30	11	6,0	6,6	5,5	9,14
10	0	30	11	6,82	6,6	8,98	9,0
11	0	30	11	6,9	7,0	8,6	7,9
12	0	30	11	6,3	7,4	7,5	7,9

Fonte: Autoria própria (2022).

As seções apresentadas na Tabela 19, referentes ao tamanho de solda s, são os pontos da peça onde foi feito o corte na serra fita. A Figura 35 mostra um exemplo das seções de corte das amostras, representadas pelas linhas vermelhas, e as partes derivadas desse corte, representadas pelos números em amarelo. A ordem crescente dos números em amarelo segue o mesmo sentido da progressão de soldagem, que é indicado pelas flechas marcadas na peça. Os números da designação Parte x-y representam:

- x: corresponde à parte da peça em relação ao ponto de início da soldagem;
- y: corresponde a parte com a qual x era unida antes do corte.

Figura 35 - Secionamento das amostras.



Fonte: Autoria própria (2022).

Os parâmetros mostrados na Tabela 18 foram comparados com os recomendados pelos fabricantes do arame de solda, onde a Figura 32 apresenta os parâmetros recomendados pela Gerdau.

Geralmente os parâmetros obtidos com os fabricantes são recomendados para a soldagem com transferência por curto-circuito. Pelo motivo de que o tipo de transferência metálica por curto-circuito não é qualificado pela norma AWS D1.1, e a transferência metálica utilizada para a realização do trabalho ser do tipo *spray*, os parâmetros obtidos com os fabricantes serão utilizados apenas para comparação. Assim, serão feitos testes para obter os parâmetros corretos para a obtenção do modo de transferência metálica por *spray*.

A Tabela 20 apresenta os dados dos testes nos quais foi obtido o método de transferência por *spray*. Dos doze testes, em três não foi obtido o modo de transferência desejado, os quais foram feitos nas amostras E4, E5 e E8. A fonte de soldagem utilizada nos testes da Tabela 20 foi a SUMIG *Falcon* 505.

Tabela 20 - Resultado dos parâmetros testados para obter transferência por *spray*.

Operador	Amostra	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de alimentação (m/min)	Diâmetro do arame (mm)	DBCP (mm)	Vazão de gás (L/min)	Sentido de soldagem
Nathan	E1	34	280	14	1,0	15-25	20	Empurrando
Nathan	E2	32,2	240	12,1	1,0	15-25	20	Empurrando
Nathan	E3	30,3	220	11,4	1,0	15-25	20	Empurrando
Nathan	E4	30	205	9,7	1,0	15-25	20	Empurrando
Nathan	E5	29,2	200	9,7	1,0	15-25	20	Empurrando
Nathan	E6	30,2	225	10,4	1,0	15-25	20	Empurrando
Nathan	E7	30,3	220	10,5	1,0	15-25	20	Empurrando
Nathan	E8	30,3	205	9,8	1,0	15-25	20	Empurrando
Nathan	E9	31,2	220	10,6	1,0	15-25	20	Empurrando
Nathan	E10	30,4	240	11,7	1,0	15-25	12	Empurrando
Nathan	E11	30,4	235	11,5	1,0	15-25	12	Empurrando
Advan	E12	30,4	230	11,2	1,0	15-25	12	Empurrando

Fonte: Autoria própria (2022).

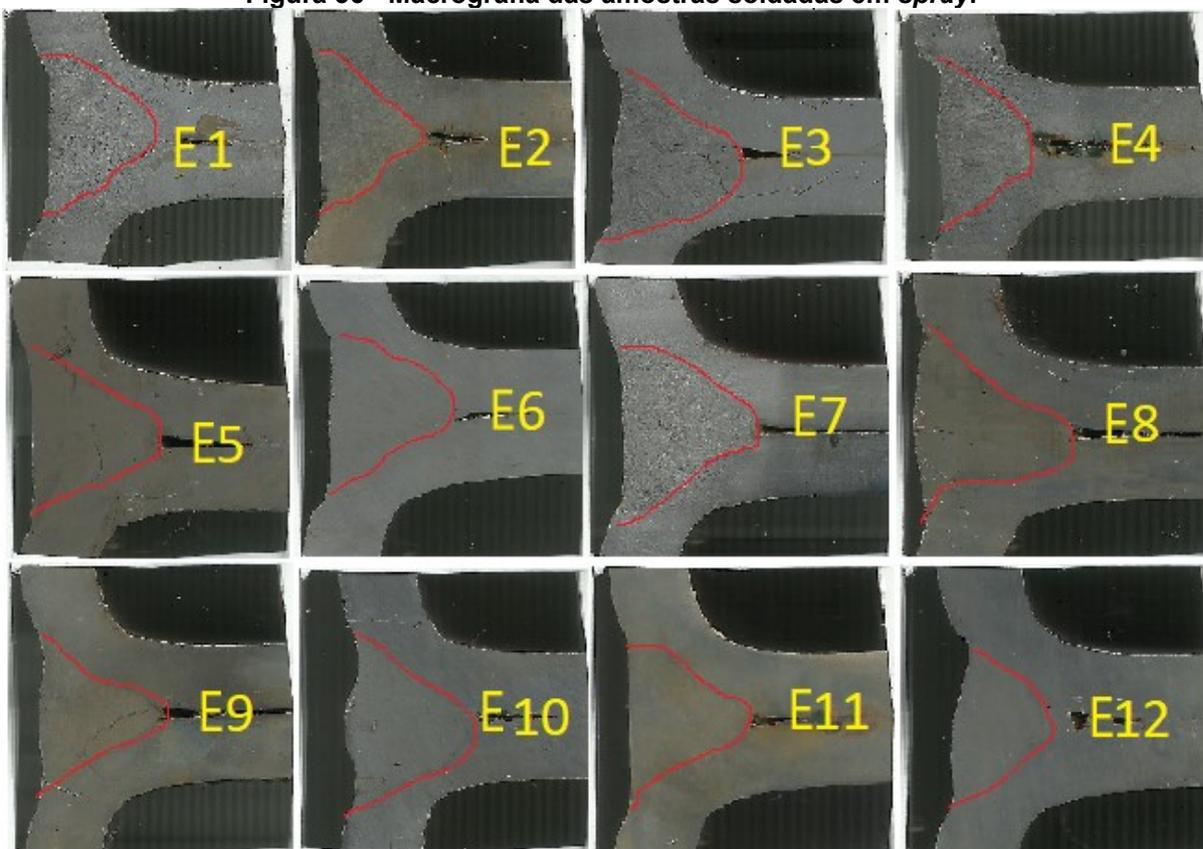
Observou-se que é possível obter o modo de transferência por *spray* com correntes acima de 220 A, juntamente com tensões superiores a 30 V.

Nas amostras E4, E5 e E8 percebeu-se que o modo de transferência estava em transição entre o curto circuito e o *spray*, pois o arco ficava estável por alguns instantes e apresentava características de *spray*, e em outros momentos apresentava características de curto circuito. Ou seja, nestas três amostras o processo estava trabalhando com transferência globular.

Outro parâmetro de grande importância na obtenção deste modo de transferência, o qual teve de ser ajustado, foi o DBCP (Distância do Bico de Contato a Peça). Na soldagem manual é difícil manter constante o valor deste parâmetro, pois pode variar conforme a técnica de operação da tocha executada pelo soldador. O DBCP normalmente utilizado pelos soldadores é de aproximadamente 10 mm. O valor deste parâmetro foi ajustado para uma faixa entre 15 e 25 mm, na qual o arco se manteve estável para a soldagem no modo de transferência por *spray*.

Após a soldagem das amostras com o modo de transferência por *spray*, foi realizada a macrografia das amostras. Sendo que foi escolhido uma seção de cada amostra para a realização da macrografia. A Figura 36 apresenta as macrografias obtidas das amostras soldadas com os parâmetros mostrados na Tabela 20.

Figura 36 - Macrografia das amostras soldadas em *spray*.



Fonte: Autoria própria (2022).

A Tabela 21 apresenta as medidas obtidas nas amostras soldadas com modo de transferência por spray. Os valores de r, f e R são iguais aos das amostras apresentadas na Tabela 19, os quais estão representados na Tabela 7.

Tabela 21 - Valores medidos nas amostras soldadas com transferência metálica por *spray*.

Amostra	Tamanho de solda (s)(mm)				Largura do cordão soldado (mm)
	Seção 1-2	Seção 2-1	Seção 2-3	Seção 3-2	
E1	8,95	9,15	8,05	7,35	12
E2	8,3	7,2	8,4	8,7	15
E3	7,55	7,4	7,35	7,45	13
E4	7,05	6,5	7,55	10,2	12
E5	9,9	8,45	8	8,1	13
E6	7,4	7,35	7,45	7,5	14
E7	8,4	7,75	7,85	8,35	11
E8	10,1	9	9,3	9,4	12
E9	8,3	8,2	7,7	7,15	12
E10	9,25	8,6	8,3	9,05	11
E11	8,2	8,15	7,25	8	12
E12	9,75	8,7	7,1	7,2	11

Fonte: Autoria própria (2022).

O tamanho de solda s mínimo, como mostrado na Tabela 7, exigido pela norma é $5/8r$, onde r é igual a 11 mm. Assim, o valor mínimo de s deve ser de 6,875 mm. Os valores medidos nas soldas de teste ultrapassaram este valor mínimo, exceto na Seção 2-1 da amostra 4. Mas como não foi obtido o modo de transferência por spray com os parâmetros utilizados na amostra 4, podemos desconsiderar esta amostra.

As amostras, nas quais foi obtido o modo de transferência por *spray*, apresentaram nível de respingos quase nulo. Ademais, não apresentaram nenhum tipo de defeito nas soldas.

A partir dos resultados obtidos, foram revistos os requisitos contidos na Tabela 3 para ver se as soldas feitas estão de acordo com a norma. A Tabela 22 apresenta esta análise.

Tabela 22 - Análise dos requisitos pra EPS pré-qualificada.

Variável	Posição	Tipo de solda	GMAW/FCAW	Está de acordo?	
				Sim	Não
Diâmetro máximo do eletrodo	Plana	Filete	1/8 in (3,2mm)	X (utiliza arame 1.0)	
		Chanfro			
		Passe de raiz			
Corrente máxima	Todas	Passe de raiz de solda em chanfro sem abertura	Dentro da gama de operações indicadas pelo fabricante do metal de adição	X	
Espessura máxima do passe de raiz	Plana	Todos	3/8 in (10mm)	X (está de acordo)	
Espessura máxima do passe de enchimento	Plana	Todos	1/4 in (6,35mm)		X (não é feito)
Tamanho máximo de solda de filete em passe único	Plana	Filete	1/2 in (12,7mm)		X (a solda feita é do tipo passe de raiz)
Largura máxima de camada em passe único	Todas (para GMAW/FCAW) F & H (para SAW)	Abertura de raiz > 1/2 in (12,7mm)	Camadas divididas		X (não há abertura de raiz)
		Qualquer camada de largura W	Ver nota a.		

Fonte: Adaptado de AWS D1.1 (2020).

A Tabela 23 apresenta o modelo de EPS pré-qualificada desenvolvido baseada nos modelos sugeridos pela AWS e pela ASME IX contidos no ANEXO A e ANEXO B respectivamente.

Tabela 23 - Modelo de EPS pré-qualificada.

Especificação de procedimento de soldagem pré-qualificada (EPS pré-qualificada)				
Nome da empresa: ---		Responsável pela EPS: Advan Lanhi		
Nº da EPS: 01	Revisão Nº:	Data: 01/12/2022		
Processo de soldagem: GMAW (MAG)		Modo:--		
Material base	Especificação	Tipo ou grade	Grupo do material (AWS)	Espessura (mm)
Material base	ASTM A572	Grade 42	II	4,75
Soldado com	ASTM A572	Grade 42	II	4,75
Reforço	---	---	---	---
Detalhes da junta				
Tipo de junta	Topo	CJP/PJP	PJP	
Tipo de chanfro	V curvado	Ângulo de chanfro	---	
Abertura de raiz (mm)	Sem abertura	Filete	---	
Face de raiz (mm)	30	Raio de curvatura	11	
Desenho esquemático da junta				
Pré aquecimento		Tratamento térmico pós soldagem		
Temperatura mínima (°C)	---	Temperatura (°C)	---	
Temperatura de interpasse máx. (°C)	---	Tempo de tratamento (s)	---	
Procedimento				
Quantidade de passes	1	Gás de proteção (composição) (%)	90(Ar)/10(CO ₂)	
Processo	MAG	Vazão (L/min)	20	
Tipo (manual, semiautomático, mecanizado, etc.)	Semiautomático	Tamanho do bocal (mm)	16	
Posição	Plana	Características elétricas		
Progressão	---	Tipo de corrente e polaridade	CC+	
Técnica (empurrando/puxando)	Empurrando	Modo de transferência	Spray	
Metal de adição (Especificação AWS)		Fonte de soldagem (CC, CV, etc.)	CV	
Classificação AWS	ER70S-6	Corrente (A)	240	
Diâmetro (mm)	1.0	Tensão (V)	32,2	
Fabricante	Gerdau	Vel. Alimentação do arame(m/min)	12,1	
		Velocidade de deslocamento (mm/s)	4,1	
Técnica de soldagem				
Linear ou costura	Linear	Stick out (mm)	15-25	
Passe múltiplo ou simples	Simple	Limpeza de interpasse	---	
Número de eletrodos	---	Ângulo positivo ou negativo	Negativo (5-10°)	

Fonte: Autoria própria (2022).

Na EPS mostrada na Tabela 23 contém todas as variáveis requisitadas pela norma. Além de atender todos os requisitos referentes ao processo de soldagem da junta de topo em V curvado utilizando a soldagem MAG para que a EPS possa ser classificada como pré-qualificada. Também apresenta os requisitos da estrutura soldada obtida a partir deste processo.

5 CONCLUSÕES

Os objetivos propostos neste trabalho foram cumpridos. Através da coleta de dados foi observado a falta de padrão dos parâmetros. Ademais, foi possível identificar alguns problemas decorrentes dessa falta de padrão, como estruturas soldadas com cordões de solda desconformes.

Constatou-se, através da análise dos ruídos característicos gerados pela soldagem nos diferentes modos de transferência metálica, e da observação da variação da corrente e tensão de soldagem durante o processo, que os parâmetros de soldagem utilizados atualmente na empresa resultam no modo de transferência metálica por curto circuito.

Para a realização da EPS pré-qualificada foi seguido os requisitos da norma AWS D1.1 de 2020 - Código de Soldagem Estrutural para Aço. Foi visto que para a realização da EPS pré-qualificada, não poderia ser utilizado o modo de transferência por curto circuito. Pois as juntas soldadas produzidas por este modo de transferência precisam ser qualificadas através de testes mecânicos.

Através de testes, e utilizando do mesmo método para identificar o modo de transferência metálica comentado anteriormente, foi obtido o modo de transferência metálica por spray. Além da corrente e a tensão de soldagem, foi visto que o DBCP também teve grande influência para a obtenção do modo de transferência por spray.

Todos os requisitos contidos na Cláusula 5 da norma AWS D1.1 de 2020, para a obtenção de uma EPS pré-qualificada, foram atendidos. A partir disso foi elaborada a EPS pré-qualificada apresentada na Tabela 23 para a junta de topo com chanfro em V curvado, utilizando o processo MAG nos modos manual e semiautomático.

Devido a isso, os resultados obtidos neste trabalho podem ser considerados satisfatórios.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, indica-se a realização de EPS's pré-qualificadas para outros tipos de juntas e processos de soldagem.

Para uma segunda sugestão, pode ser considerado o desenvolvimento de uma EPS qualificada, utilizando metais base ou processos de soldagem não qualificados por norma, onde será necessário a realização de testes mecânicos para a validação da mesma.

REFERÊNCIAS

- AMATOOLS - Ferramentas para qualquer trabalho - Rocast. **AMATOOLS - A MINHA FERRAMENTA**. Disponível em: <<https://www.amatools.com.br/calibres-para-solda/>>. Acesso em: 15 agosto 2022.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **WELDING INSPECTION HANDBOOK**. Third. ed. Miami: LeJeune Road, 2000.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **A3.0: Standard Welding Terms and Definitions**. Miami: [s.n.], 2001.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **WELDING SCIENCE AND TECHNOLOGY**. Ninth Edition. ed. Miami: Welding Handbook Committee, v. Vol. 1, 2001.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **WELDING PROCESSES, PART 1**. Ninth Edition. ed. MIAMI: Welding Handbook Committee, v. Vol.2, 2004.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **A5.18: Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding**. AWS. Miami. 2005.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **B2.1: Base Metal Grouping for Welding Procedure and Performance Qualification**. 3rd. ed. [S.I.]: [s.n.], 2014.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **A2.4: STANDARD SYMBOLS FOR WELDING, BRAZING AND NONDESTRUCTIVE EXAMINATION**. 8th. ed. [S.I.]: [s.n.], 2020.
- ARCELOMITTAL BRASIL S.A. **Certificado de Qualidade**. Serra. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10474: QUALIFICAÇÃO EM SOLDAGEM - Terminologia**. [S.I.]. 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR16079-1: Ensaio Não Destrutivos - Terminologia - Parte 1: Descontinuidades em juntas soldadas**. ABNT. Rio de Janeiro. 2012.
- BALMER. **Tabela MIG/MAG**. [S.I.]. 2022.
- CARBOGRAFITE. **CARBOGRAFITE**, 2020. Disponível em: <<https://carbografite.com.br/categoria/fluxometros>>. Acesso em: 22 novembro 2022.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 3. ed. ed. São Paulo: Blucher, 1974.
- ENSAIO Macrográfico - Infosolda. **Infosolda**, 2018. Disponível em: <<https://infosolda.com.br/219-ensaio-macrografico/>>. Acesso em: 09 novembro 2022.
- ESAB. **Manual do usuario e peças de reposição**. [S.I.], p. 48. 2016.

GERDAU. **ARAMES PARA SOLDA GERDAU**. [S.l.], p. 6. 2022.

GERDAU. Arames para solda - Catálogos e Manuais. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/produtos/arames-para-solda?gclid=Cj0KCKQiAtJeNBhCVARIsANJUJ2GRkGw6wz6JwJh14F_fe1ZXhs5z3FKIGxsdRLRicIJuGvkQwY8vVfgaAuvrEALw_wcB>. Acesso em: 30 novembro 2021.

GIMENES, L. Guia prático para compreensão EPS, RQP, RQS, IEIS. **INFOSOLDA**, 2018. Disponível em: <<https://infosolda.com.br/artigos/inspecao-de-soldagem-procedimentos/487-guia-pratico-para-compreensao-eps-rqp-e-rqs>>. Acesso em: 12 Novembro 2021.

INFOSOLDA - O Portal Brasileiro de Soldagem. **INFOSOLDA.com.br - O Portal Brasileiro da Soldagem**. Disponível em: <<https://infosolda.com.br/219-ensaio-macrografico/>>. Acesso em: 5 novembro 2022.

LOJA do Mecânico. **LojadoMecanico**. Disponível em: <<https://www.lojadomecanico.com.br/produto/126516/31/271/trena-curta-de-aco-75-mm-x-25-mm-vonder-3868770750>>. Acesso em: 15 novembro 2022.

LUCA, R. D. DESCONTINUIDADES NA SOLDAGEM. **Infosolda**, 2014. Disponível em: <<https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/metall/Descontinuidadesnasoldagem.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2021.

MACHADO, I. G. **SOLDAGEM & TECNICA CONEXAS: PROCESSOS**. Porto Alegre: editado pelo autor, 2007.

MARCONI, C. et al. **Influencia del Calor Aportado y Metal de Aporte Sobre las Propiedades Mecánicas y la Microestructura de Juntas Soldadas Por FCAW de Acer Microaleado de Alta Resistencia**. Buenos Aires, p. 13. 2015. (DOI: 10.1590/0104-9224/SI2002.03).

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **SOLDAGEM FUNDAMENTOS E TECNOLOGIA**. BELO HORIZONTE: UFMG, 2011.

MICALLI JR, A. R. et al. **Manual de Tecnologia de Fabricação e Soldagem**. São Paulo: Núcleo Tecnológico de Soldagem & Qualidade, 2002.

MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 151. 2007.

MONTAGENS, G. gmfmontagens.com.br. **GMF Montagens**. Disponível em: <<https://www.gmfmontagens.com.br/>>. Acesso em: 18 maio 2022.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **ENGENHARIA DE SOLDAGEM E APLICAÇÕES**. Rio de Janeiro: LTC - LIVROS TÉCNICOS E CIENTÍFICOS, 1982.

PERFYAÇO METAIS. **Certificado de Qualidade**. Palhoça. 2021.

SENAI. **SOLDAGEM MIG/MAG**. Sergipe (Apostila), p. 93. 2008.

SUMIG. Tudo que você precisa saber sobre o processo de soldagem MIG/MAG. **SUMIG**, 2018. Disponível em: <<https://www.sumig.com/pt/blog/post/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-processo-de-soldagem-mig-mag>>. Acesso em: 03 dez. 2021.

SUMIG. **Arame MIG/MAG - Aço Carbono ER70S-6**. Caxias do Sul, p. 2. 2019.

SUMIG. **MANUAL DE INSTRUÇÕES FALCON 402**. Caxias do Sul, p. 20. 2020.

SUMIG. **MANUAL DE INSTRUÇÕES FALCON 502**. Caxias do Sul, p. 22. 2020.

SUMIG. **MANUAL DE INSTRUÇÕES FALCON 505**. Caxias do Sul, p. 31. 2021.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **CÓDIGO ASME DE CALDEIRAS E VASOS DE PRESSÃO**. 1983. ed. [S.I.]: ASME, 1983.

**ANEXO A – AMOSTRA EM BRANCO DE FORMULÁRIO PARA EPS SUJERIDO
PELA AWS**

**ANEXO B – FORMATO SUGERIDO PARA EPS APRESENTADO PELA ASME
SEÇÃO IX**

Organization Name _____ By _____
 Welding Procedure Specification No. _____ Date _____ Supporting PQR No.(s) _____
 Revision No. _____ Date _____

Welding Process(es) _____ Type(s) _____
(Automatic, Manual, Machine, or Semi-Automatic)

<p>JOINTS (QW-402)</p> <p>Joint Design _____ Root Spacing _____ Backing: Yes _____ No _____ Backing Material (Type) _____ <small>(Refer to both backing and retainer)</small></p> <p><input type="checkbox"/> Metal <input type="checkbox"/> Nonfusing Metal <input type="checkbox"/> Nonmetallic <input type="checkbox"/> Other</p> <p>Sketches, Production Drawings, Weld Symbols, or Written Description should show the general arrangement of the parts to be welded. Where applicable, the details of weld groove may be specified.</p> <p>Sketches may be attached to illustrate joint design, weld layers, and bead sequence (e.g., for notch toughness procedures, for multiple process procedures, etc.)</p>	<p style="text-align: center;">Details</p> <div style="border: 1px solid black; height: 150px; width: 100%;"></div>
--	--

***BASE METALS (QW-403)**

P-No. _____ Group No. _____ to P-No. _____ Group No. _____

OR

Specification and type/grade or UNS Number _____
 to Specification and type/grade or UNS Number _____

OR

Chem. Analysis and Mech. Prop. _____
 to Chem. Analysis and Mech. Prop. _____

Thickness Range: _____

Base Metal: Groove _____ Fillet _____
 Maximum Pass Thickness ≤ 1/2 in. (13 mm) (Yes) _____ (No) _____

Other _____

*FILLER METALS (QW-404)	1	2
Spec. No. (SFA) _____		
AWS No. (Class) _____		
F-No. _____		
A-No. _____		
Size of Filler Metals _____		
Filler Metal Product Form _____		
Supplemental Filler Metal _____		
Weld Metal		
Deposited Thickness:		
Groove _____		
Fillet _____		
Electrode-Flux (Class) _____		
Flux Type _____		
Flux Trade Name _____		
Consumable Insert _____		
Other _____		

WPS No. _____ Rev. _____

POSITIONS (QW-405) Position(s) of Groove _____ Welding Progression: Up _____ Down _____ Position(s) of Fillet _____ Other _____				POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407) Temperature Range _____ Time Range _____ Other _____																													
PREHEAT (QW-406) Preheat Temperature, Minimum _____ Interpass Temperature, Maximum _____ Preheat Maintenance _____ Other _____ (Continuous or special heating, where applicable, should be recorded)				GAS (QW-408) <table style="width:100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="3" style="text-align: center;">Percent Composition</th> </tr> <tr> <th style="text-align: center;">Gas(es)</th> <th style="text-align: center;">(Mixture)</th> <th style="text-align: center;">Flow Rate</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Shielding</td> <td style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px;"></td> <td style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px;"></td> <td style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px;"></td> </tr> <tr> <td>Trailing</td> <td style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px;"></td> <td style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px;"></td> <td style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px;"></td> </tr> <tr> <td>Backing</td> <td style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px;"></td> <td style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px;"></td> <td style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px;"></td> </tr> <tr> <td>Other</td> <td style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px;"></td> <td style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px;"></td> <td style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px;"></td> </tr> </tbody> </table>								Percent Composition			Gas(es)	(Mixture)	Flow Rate	Shielding				Trailing				Backing				Other			
	Percent Composition																																
	Gas(es)	(Mixture)	Flow Rate																														
Shielding																																	
Trailing																																	
Backing																																	
Other																																	
ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)																																	
		Filler Metal																															
Weld Pass(es)	Process	Classifi- cation	Diameter	Current Type and Polarity	Amps (Range)	Wire Feed Speed (Range)	Energy or Power (Range)	Volts (Range)	Travel Speed (Range)	Other (e.g., Remarks, Com- ments, Hot Wire Addition, Technique, Torch Angle, etc.)																							
Amps and volts, or power or energy range, should be recorded for each electrode size, position, and thickness, etc.																																	
Pulsing Current _____ Heat Input (max.) _____																																	
Tungsten Electrode Size and Type _____ <small>(Pure Tungsten, 2% Thoriated, etc.)</small>																																	
Mode of Metal Transfer for GMAW (FCAW) _____ <small>(Spray Arc, Short Circuiting Arc, etc.)</small>																																	
Other _____																																	
TECHNIQUE (QW-410) String or Weave Bead _____ Orifice, Nozzle, or Gas Cup Size _____ Initial and Interpass Cleaning (Brushing, Grinding, etc.) _____ Method of Back Gouging _____ Oscillation _____ Contact Tube to Work Distance _____ Multiple or Single Pass (Per Side) _____ Multiple or Single Electrodes _____ Electrode Spacing _____ Peening _____ Other _____																																	