

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**RELAÇÃO IWP E DWP EM GMAW PARA PROJETO DE  
JUNTAS TIPO T POR FILOSOFIA BAYESIANA**

**FILLIPE MENDONÇA ALBUQUERQUE**

**ORIENTADOR: SADEK CRISÓSTOMO ABSI ALFARO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO  
EM SISTEMAS MECATRÔNICOS**

**PUBLICAÇÃO: PPMEC.DM 70 A/14  
BRASÍLIA/DF, 30 JUNHO 2014.**

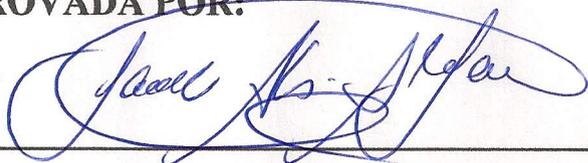
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**RELAÇÃO IWP E DWP EM GAWM PARA PROJETO DE  
JUNTAS TIPO T POR FILOSOFIA BAYESIANA**

**FILLIPE MENDONÇA ALBUQUERQUE**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM SISTEMAS MECATRÔNICOS.**

**APROVADA POR:**



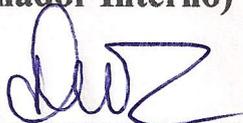
---

**Prof. Sadek Crisostomo Absi Alfaro, PhD (ENM-UnB)  
(Orientador)**



---

**Prof. Guilherme Caribé de Carvalho, PhD (ENM-UnB)  
(Examinador Interno)**



---

**Prof. José Alfredo Ruiz Vargas, PhD (ENE-UnB)  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 30 JUNHO 2014.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

ALBUQUERQUE, FILLIPE MENDONÇA.

Relação IWP e DWP em GMAW para projeto de juntas tipo T por filosofia bayesiana. [Distrito Federal] 2014.

xvii, 120 p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2014).

Dissertação de Mestrado Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Solda

2. Junta

3. GMAW

4. Bayes

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALBUQUERQUE, F. M. (2014). Relação IWP e DWP em GMAW para projeto de juntas tipo T por filosofia bayesiana. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação PPMEC.DM 70 A/14, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

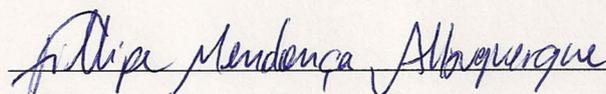
AUTOR: Fillipe Mendonça Albuquerque

TÍTULO: Relação IWP e DWP em GMAW para projeto de juntas tipo T por filosofia bayesiana.

GRAU: Mestre

ANO: 2014

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.



Fillipe Mendonça Albuquerque

## AGRADECIMENTOS

Minha querida família, os meus mais sinceros agradecimentos, a cada um de vocês, por acreditar, apoiar e sacrificar do seu tempo ao meu lado em prol dessa etapa da minha vida.

À minha grande parceira e amiga Eliza Cristina, pelo apoio irrestrito ao longo de tantos anos. Sou grato a ti, dona Eliza, por momentos tão turbulentos e tão agradáveis ao seu lado.

Minha gratidão se estende àqueles que apoiaram, por demais, a minha caminhada ao longo do mestrado, principalmente nos tropeços e acertos na busca pelo saber. Sou grato pelo espaço aos desabafos, por me tratarem com humanidade, sempre, como feito pelo senhor Álvaro Patiño, senhor Esdras Ramos, senhora Patrícia Tavares, senhora Ana Paula Bernardi e senhor Jesús Emílio.

Ao suporte técnico incansável do senhor Antônio Marrocos, com sua postura extremamente profissional e infinita vontade de ajudar. Mostrou-se um facilitador, franco e assertivo, na ruidosa comunicação entre alunos, professores, GRACO e SG9.

À UnB e PPMEC, por terem me aceitado e acreditado no meu potencial de realizar este trabalho.

À CAPES, pelo auxílio financeiro oportuno.

Ao meu orientador, Sadek C. A. Alfaro, por ser tão acessível e franco em nossas conversas. Sou grato pela autonomia na escolha e condução dos meus trabalhos.

À equipe técnica do Laboratório de Mecânica SG9, Marcos, Xavier, Tássis e Arthur, pela prontidão nas tarefas de oficina e metrologia.

“In science, as in life, you may befriend a few. The others are drows”.

Fillipe Albuquerque

Dedicado ao pai e ao filho,  
por tudo,  
nos momentos bons, ruins e feios.

## RESUMO

# RELAÇÃO IWP E DWP EM GMAW PARA PROJETO DE JUNTAS TIPO T POR FILOSOFIA BAYESIANA

**Autor: Fillipe Mendonça Albuquerque**

**Orientador: Sadek Crisostomo Absi Alfaro**

**Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos PPMEC**

**Brasília, 30 de junho de 2014**

A modelagem de parâmetros indiretos (em inglês *Indirect Welding Parameters*, IWP) e diretos (em inglês *Direct Welding Parameters*, DWP) é alvo de investigação desde 1940 através de modelos analíticos, seguido de modelos empíricos, estatísticos, por redes neurais, entre outros. No entanto, ainda é superficial o conhecimento que se tem sobre a relação de IWP e DWP que atenda os requisitos de projetos em soldagem estrutural em juntas de ângulo em 90°.

Este trabalho apresenta um método para associar por probabilidades um grupo de IWP, como as variáveis tensão elétrica de soldagem, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação do arame, aos critérios de projetos de junta tipo T como elemento estrutural, através da aplicação da Regra de Bayes em um universo definido por planejamento fatorial.

Os dados foram coletados a partir do processo de soldagem a arco elétrico com gás de proteção, alimentação contínua de eletrodo não revestido e sólido, em modo de transferência por curto-circuito (em inglês *Gas Metal Arc Welding*). Utilizaram-se juntas de ângulo de 90°, com cordões intermitentes em apenas um lado da junta, na posição 2F. Amostras foram colhidas de secções transversais das juntas e medidas em um projetor de perfil. Os resultados mostram que é possível direcionar a configuração das variáveis de entrada do processo de soldagem através das distribuições de probabilidade obtidas para um dado valor de largura do filete, considerando o conhecimento *a priori* do universo investigado e o cálculo das relações de IWP e DWP por Regra de Bayes.

Palavras-chave: Solda. Junta. GMAW. Bayes.

## **ABSTRACT**

# **IWP AND DWP RELATION IN GMAW TO T-JOINT PROJECTS BY BAYESIAN PHILOSOPHY**

**Author: Fillipe Mendonça Albuquerque**  
**Supervisor: Sadek Crisostomo Absi Alfaro**  
**Mechatronics Systems Post-graduation Program PPMEC**  
**Brasília, June 30th 2014**

Researches about modeling Indirect and Direct Welding Parameters are around since 1940, through analytical, empirical, statistical, neural networks, among other models. Nonetheless, the knowledge about them is still superficial when the subject is the relationship of IWP and DWP required on 90° angled welded joints at structural weldments.

This work presents a method to associate by probabilities a group of IWP, such as welding voltage, welding speed and wire feed speed variables, to T joint welding requirements as a structural element through Bayes Rule in a universe defined by factorial planning.

The data is collected from a GMAW-S process in a 90° steel angled joint, with intermittent weld bead on one side of the joint, at 2F welding position. Samples were collected from a transversal sectioning of the joint and measured in a profile projector. The results showed that is possible to guide the configuration of input welding variables through probabilities distributions obtained given a known fillet size, having considered the *a priori* knowledge of the researched universe and the calculus of the Bayes relationships.

Keywords: Weld. Joint. GMAW. Bayes.

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 2.1 - Classificação e subclassificação dos modos de transferência metálica GMAW (modificado de LOPERA, 2010).....                         | 43  |
| Tabela 2.2 - Convexidade máxima (modificado de AWS D1.1, 2006).....  | 52  |
| Tabela 2.3 - Valores aproximados para soldagem de ferrocarbono em curto-circuito (ALTHOUSE <i>et al.</i> , 2013). ....                           | 63  |
| Tabela 3.1 - Composição Aço SAE/AISI.....  | 77  |
| Tabela 3.2 - Avaliação das velocidades de soldagem. ....   | 82  |
| Tabela 3.3 - Informação técnica da fonte. ....   | 83  |
| Tabela 3.4 - EPS experimental (NADZAM <i>et al.</i> , 1995; PARMAR, 1995; TAMBOLI, 1999; MILLER WELDS, 2012; ALTHOUSE <i>et al.</i> , 2013)..... | 83  |
| Tabela 3.5 - Informação Adicionais do eletrodo <i>DENVER - MIG</i> de 1,2 mm.....  | 84  |
| Tabela 3.6 - Planejamento fatorial.....  | 88  |
| Tabela 3.7 - Dimensões obtidas do perfil dos filetes no projetor. ....   | 92  |
| Tabela 3.8 - Avaliação estatística das dimensões dos filetes. ....   | 93  |
| Tabela 3.9 - Número de eventos por IWP. ....   | 93  |
| Tabela 3.10 - Tensão de soldagem e largura do filete. ....   | 94  |
| Tabela 3.11 - Velocidade de soldagem e largura do filete. ....   | 94  |
| Tabela 3.12 - Velocidade de alimentação do arame e largura do filete.....  | 95  |
| Tabela 3.13 - Largura do filete por tensão de soldagem. ....   | 98  |
| Tabela 3.14 - Largura do filete por velocidade de soldagem. ....   | 100 |
| Tabela 3.15 - Largura do filete por velocidade de alimentação do arame.....  | 101 |
| Tabela 3.16 - Relação $W$ , $l$ e $t$ para GMAW-S.....   | 101 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 - Componentes do processo GMAW manual.....  | 22 |
| Figura 2.2 - Variáveis de entrada e saída em GMAW (modificado de Cook, 1981). .....  | 24 |
| Figura 2.3 - Relação IWP e DWP em GMAW (modificado de NAIDU <i>et al.</i> , 2003). .....   | 24 |
| Figura 2.4 - Vizinhança da tocha em GMAW.....  | 25 |
| Figura 2.5 – Curvas características de fontes de soldagem, em (A) tensão e corrente constante, em (B) tensão constante (ROADKILL, 2013). .....   | 26 |
| Figura 2.6 - Efeito da tensão elétrica na geometria do cordão (WEMAN, 2003). .....   | 27 |
| Figura 2.7 - Efeito da corrente elétrica na geometria do cordão (WEMAN, 2003). .....   | 28 |
| Figura 2.8 - Indutância, valor alto (esquerda) e baixo (direita) (WEMAN, 2003). .....  | 29 |
| Figura 2.9 – Polaridade em DCEN e DCEP (modificado de ROADKILL, 2013). .....   | 30 |
| Figura 2.10 - Influência da velocidade de soldagem no cordão de solda. ....  | 30 |
| Figura 2.11 - Exemplificação de <i>undercut</i> em junta de topo. ....   | 31 |
| Figura 2.12 - Ângulo da tocha, de acesso ou trabalho, e de ataque ou deslocamento. ....  | 32 |
| Figura 2.13 - Em (a) deslocamento positivo ( <i>drag</i> ou <i>backhand</i> ), em (b) perpendicular ou vertical, e em (c) negativo ( <i>push</i> ou <i>forehand</i> ) (WEMAN, 2003). ..... | 33 |
| Figura 2.14 - Posicionamento angular adequado da tocha para soldagem de filete (modificado de WEMAN, 2003). .....  | 34 |
| Figura 2.15 - Influência do CTWD na geometria do cordão de solda. ....   | 35 |
| Figura 2.16 - Possível configuração para GMAW-S, CTWD menor que <i>stand off</i> . .....   | 36 |
| Figura 2.17 - CTWD, <i>stand off</i> e <i>stick out</i> para junta T. ....   | 36 |
| Figura 2.18 - Influência geral da escolha do gás na geometria global da poça de fusão (modificado de ALTHOUSE <i>et al.</i> , 2013). .....   | 39 |
| Figura 2.19 - Da esquerda para a direita, bocal e difusor do tipo <i>gas lens</i> , e bocal padrão, respectivamente, ambos utilizados em TIG.....  | 40 |
| Figura 2.20 - Tipos básicos de juntas soldadas, vista em perspectiva e corte transversal (modificado de TAMBOLI, 1999 e TIMINGS, 2008). .....  | 45 |
| Figura 2.21 – Exemplos de distribuição de esforços (WEMAN, 2003). .....  | 46 |
| Figura 2.22 - Exemplos de movimentação do eletrodo, sem ou com tecimento. ....   | 47 |
| Figura 2.23 - Tipos comuns de chanfros para o projeto das juntas (modificado de GREGORY <i>et al.</i> , 2005 e AWS A3.0, 2010). .....  | 47 |
| Figura 2.24 - Posições de soldagem. ....   | 48 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.25 - Exemplo de tradução entre posição de teste e produção (modificado de ASME, 2013).....  | 49 |
| Figura 2.26 - Nomenclatura da geometria do cordão de solda. ....   | 50 |
| Figura 2.27 - Penetração total e parcial em junta com chanfro. ....  | 51 |
| Figura 2.28 - Requerimentos de penetração para solda em filete de junta tipo T (modificado de TAMBOLI, 1999). ....   | 51 |
| Figura 2.29 – Parâmetros do filete (modificado de AWS WHB, 1984).....  | 52 |
| Figura 2.30 - Perfis esperados de filete em junta tipo T (modificado de AWS D1.1, 2006). ....  | 53 |
| Figura 2.31 - Relação para o menor volume de filete. ....  | 55 |
| Figura 2.32 - Geometria considerada para o filete. ....  | 56 |
| Figura 2.33 - Diferença na capacidade de carga em aço carbono para ASD e LRFD. (modificado de QUIMBY, 2008) ....   | 56 |
| Figura 2.34 - Localização dos elementos e símbolos de soldagem (ISO 2553, 2013).....   | 59 |
| Figura 2.35 - Marcação de limites do filete na prática. ....   | 60 |
| Figura 2.36 - Rebolos e medidas de mercado (NORTON ABRASIVOS, 2013).....   | 61 |
| Figura 2.37 - Em GMAW-S ocorre a extinção momentânea do arco elétrico. ....  | 62 |
| Figura 2.38 - Histograma de tempo entre curtos-circuitos em GMAW-S (modificado de NORRISH, 1992). ....   | 62 |
| Figura 2.39 - Modos de transferência metálica por gás de proteção, 98% Ar + 2% CO2 (modificado de PIRES <i>et al.</i> , 2012) e 100% Ar (MODENESI, 2008), respectivamente... | 64 |
| Figura 2.40 - Relação $P[A B]$ na intersecção entre conjuntos. ....  | 66 |
| Figura 2.41 - Exemplo simplificado de uma rede bayesiana (modificado de HECKERMAN, 1995). ....   | 66 |
| Figura 2.42 - Espaço amostral S dividido em partes mutuamente exclusivas (LEON-GARCIA, 1994). ....   | 67 |
| Figura 2.43 – Exemplos de calibre de solda. ....   | 71 |
| Figura 2.44 - Diferença entre perfil do laser para (A) junta de topo e (B) junta T.....  | 73 |
| Figura 2.45 - Projetor de Perfil, Laboratório de Metrologia ENM-UnB.....   | 74 |
| Figura 2.46 - Funções para estimar (A) perna, (B) largura e (C) distorção no filete e junta. ....  | 75 |
| Figura 3.1 - Grupos de peças para soldagem.....  | 77 |
| Figura 3.2 - Em (a) ferramentas, (b) marcação longitudinal na linha neutra do metal base e (c) ponteamento da junta. ....  | 79 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 3.3 - Amostra de dez peças preparadas para soldagem em filete.....   | 79  |
| Figura 3.4 - Posição da tocha para soldagem de junta tipo T, de acordo com Figura 2.14.   | 80  |
| Figura 3.5 - Base para suporte da junta tipo T a ser soldada.....   | 80  |
| Figura 3.6 - Ângulos de Euler para TCP 1.....   | 81  |
| Figura 3.7 - Sinal de tensão e corrente sem ruído no OSC do Waveview for Windows®.  | 86  |
| Figura 3.8 - Sinal adquirido de tensão (verde) e corrente (azul) elétrica, normalizados no processo GMAW-S. ....                              | 86  |
| Figura 3.9 - Correlação entre <i>stick out</i> (a: 5 mm, b: 10 mm, c: 20 mm) e $I_S$ para eletrodo de 1,2 mm de diâmetro (NORRISH, 1992)..... | 87  |
| Figura 3.10 - Esquema das distribuições dos cordões de solda na junta tipo T. ....  | 88  |
| Figura 3.11 - Franho FM 500 em corte de junta tipo T. ....  | 89  |
| Figura 3.12 - Cordão de solda intermitente e junta seccionada.....  | 89  |
| Figura 3.13 - Visualização do perfil do filete no projetor. ....  | 90  |
| Figura 3.14 - Amostra de perfis de filetes obtidos. ....  | 91  |
| Figura 3.15 - Distribuição de tensão de soldagem por largura do filete.....   | 99  |
| Figura 3.16 - Distribuição de velocidade de soldagem por largura do filete.....   | 100 |
| Figura 3.17 - Distribuição de velocidade de alimentação do arame por largura do filete.   | 101 |

## LISTA DE ACRÔNIMOS E SÍMBOLOS

| <b>Acrônimos</b> | <b>Descrição</b>  |
|------------------|---|
| AISI             | Instituto Americano de Ferro e Aço (em inglês <i>American Iron and Steel Institute</i> )                        |
| AISC             | Instituto Americano da Construção em Aço (em inglês <i>American Institute of Steel Construction</i> )           |
| ARLA             | Linguagem de programação de robôs ABB (em inglês <i>ASEA Programming Robot Language</i> )                       |
| ASD              | Projeto da Tensão Admissível (em inglês <i>Allowed Stress Design</i> )  |
| ASME             | Sociedade Norte-americana de Engenheiros Mecânicos (em inglês <i>American Society of Mechanical Engineers</i> ) |
| AWS              | Sociedade Americana de Solda (em inglês <i>American Welding Society</i> )                                       |
| BNN              | Redes Neurais Bayesianas (em inglês <i>Bayesian Neural Net</i> )  |
| BGNN             | Redes Neurais Bayesianas-Gaussianas (em inglês <i>Bayesian-Gaussian Neural Net</i> )                            |
| BPNN             | Redes neurais em retropropagação (em inglês <i>Backpropagation Neural Net</i> )                                 |
| CCD              | Dispositivo de Carga Acoplada (em inglês <i>Charged Coupled Device</i> )  |
| CJP              | Penetração Total (em inglês <i>Complete Joint Penetration</i> )   |
| CMOS             | Semicondutor de Óxido Metálico Complementar (em inglês <i>Complementary Metal-oxide Semiconductor</i> )         |
| DAG              | Gráficos Acíclicos Dirigidos (em inglês <i>Directed Acyclic Graph</i> )   |
| DCEP             | Eletrodo Positivo e Corrente Contínua (em inglês <i>Direct Current Electrode Positive</i> )                     |
| DCP              | Distância entre tubo de contato e metal base (em inglês <i>contact tube to workpiece distance, CTWD</i> )       |
| DCRP             | Polaridade Reversa e Corrente Contínua (em inglês <i>Direct Current Reverse Polarity</i> )                      |
| DCEN             | Eletrodo Negativo e Corrente Contínua ( <i>Direct Current Electrode Negative</i> )                              |
| DCSP             | Polaridade Direta e Corrente Contínua (em inglês <i>Direct Current Straight Polarity</i> )                      |
| DL               | Carga morta (em inglês <i>Dead Load</i> )   |
| DWP              | Parâmetros Diretos de Soldagem (em inglês <i>Direct Welding Parameters</i> )                                    |

|        |  |
|--------|--|
| EPS    | Especificação de Procedimento de Soldagem (em inglês <i>Welding Procedure Specification, WPS</i> )                                   |
| GMAW   | Processo de soldagem a arco elétrico, alimentação contínua e eletrodo sólido não revestido (em inglês <i>Gas Metal Arc Welding</i> ) |
| GMAW-P | Modo de transferência metálica pulsada para GMAW   |
| GMAW-S | Modo de transferência metálica em curto-circuito para GMAW   |
| GTAW   | Processo de soldagem a arco elétrico e eletrodo de tungstênio não consumível (em inglês <i>Gas Tungsten Arc Welding</i> )            |
| HLAW   | Processo de soldagem a laser híbrido (em inglês <i>Hibird Laser Arc Welding</i> )  |
| IIW    | Instituto Internacional de Soldagem (em inglês <i>International Institute of Welding</i> )   |
| INPM   | Grau do Instituto de Pesos e Medidas   |
| ISO    | Organização Internacional para Padronização (em inglês <i>International Organization for Standardization</i> )                       |
| IWP    | Parâmetros Indiretos de Soldagem (em inglês <i>Indirect Welding Parameters</i> )   |
| LL     | Carga Viva (em inglês <i>Living Load</i> )   |
| LRFD   | Coefficiente de Projeto para Carga e Resistência (em inglês <i>Load and Resistance Factor Design</i> )                               |
| MAG    | Processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo sólido consumível e gás de proteção ativo (em inglês <i>Metal Active Gas</i> )     |
| MIG    | Processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo sólido consumível e gás de proteção inativo (em inglês <i>Metal Inert Gas</i> )    |
| NEMA   | Associação Nacional de Fabricantes Elétricos (em inglês <i>National Electrical Manufacturers Association</i> )                       |
| OCV    | Tensão Elétrica em circuito aberto (em inglês <i>Open-circuit Voltage</i> )  |
| PJP    | Penetração parcial (em inglês <i>Partial Joint Penetration</i> )   |
| PWHT   | Tratamento Térmico Pós-solda (em inglês <i>Postweld Heat Treatment</i> )   |
| ROB    | Interface Robótica (em inglês <i>Robot Interface</i> )   |
| SAE    | Sociedade de Engenheiros da Mobilidade (em inglês <i>Society of Automotive Engineers</i> )   |
| SMAW   | Processo de soldagem a arco elétrico e eletrodo revestido (em inglês <i>Shielded Metal Arc Welding</i> )                             |
| TCP    | Ponto Central da Ferramenta (em inglês <i>Tool Center Point</i> )  |

|       |   |
|-------|---|
| TIG   | Processo de soldagem a arco elétrico e eletrodo de tungstênio não consumível (em inglês <i>Tungsten Inert Gas</i> ) |
| $U_S$ | Tensão elétrica de soldagem   |
| $U_A$ | Tensão do arco elétrico   |
| $U_E$ | Tensão elétrica do eletrodo   |
| VI    | Instrumento Virtual (em inglês <i>Virtual Instrument</i> )  |
| WFS   | Velocidade de Alimentação do Arame (em inglês <i>Wire Feed Speed</i> )  |
| WS    | Velocidade de Soldagem (em inglês <i>Welding Speed</i> )  |
| ZTA   | Zona Termicamente Afetada (em inglês <i>Heat-affected Zone</i> , HAZ)   |

| <b>Símbolos</b> | <b>Descrição</b>   |
|-----------------|--|
| $\alpha_1$      | Ângulo entre força $F_\alpha$ e seção do filete                                    |
| $\alpha_2$      | Ângulo de trabalho da tocha  |
| $\alpha_3$      | Primeira constante empírica para taxa de derretimento do eletrodo                  |
| $A_R$           | Área da seção do eletrodo, em mm <sup>2</sup>                                      |
| $\beta$         | Segunda constante empírica para taxa de derretimento do eletrodo                   |
| $d$             | Altura da solda em relação ao plano do filete em análise, em mm                    |
| $D_R$           | Diâmetro do eletrodo, em mm  |
| $F_\alpha$      | Força perpendicular à seção analisada, em N  |
| $F_t$           | Força atuando no plano da garganta do filete, em N                                 |
| $F_{PL}$        | Capacidade da chapa de metal, em N   |
| $f_{uk}$        | Tensão última, máxima ou limite de resistência do metal base, em N/mm <sup>2</sup> |
| $f_{euk}$       | Tensão última, máxima ou limite de resistência do eletrodo, em N/mm <sup>2</sup>   |
| $f_{wuk}$       | Tensão última, máxima ou limite de resistência da solda, em N/mm <sup>2</sup>      |
| $I_S$           | Variável corrente elétrica de soldagem, em A                                       |
| $l_{out}$       | Comprimento do arame projetado pelo bico de contato ou <i>stick out</i> , em mm    |
| $L_{cordão}$    | Comprimento do cordão de solda, em mm  |
| $\sigma_k$      | Fator de segurança   |
| $M_R$           | Taxa de consumo do eletrodo (em inglês <i>melting rate</i> ), em mm/s              |
| $R_d$           | Resistência dinâmica do eletrodo, em $\Omega$                                      |
| $R_n$           | Resistência nominal da estrutura, em N   |
| S               | Tamanho do filete côncavo, em mm   |
| $t_t$           | Garganta teórica, em mm  |

|              |  |
|--------------|--|
| $t_e$        | Garganta efetiva, em mm  |
| $t_r$        | Garganta real, em mm   |
| $S$          | Tamanho do filete, em mm   |
| $\Omega$     | Fator de segurança para metodologia ASD  |
| $\eta$       | Modificador das cargas   |
| $\eta_D$     | Modificador das cargas pela ductilidade do material  |
| $\eta_R$     | Modificador das cargas à redundância   |
| $\eta_I$     | Modificador das cargas à importância da operação   |
| $\phi$       | Fator de resistência   |
| $x$          | Mudança de variável para $tg \theta$   |
| $\gamma$     | Fatores de carga   |
| $\rho_e$     | Resistividade elétrica do eletrodo, em $\Omega \cdot \text{mm}$                              |
| $U_{S1}$     | Variável aleatória para tensão elétrica de soldagem  |
| $u_{S1}$     | Variável tensão elétrica de soldagem, em V   |
| $WFS_1$      | Variável aleatória para velocidade de alimentação do arame                                   |
| $wfs_1$      | Variável velocidade de alimentação do arame, em m/min  |
| $WS_1$       | Variável aleatória para velocidade de soldagem   |
| $ws_1$       | Variável velocidade de soldagem, em mm/s   |
| $\gamma_n$   | Coefficiente de fator de segurança   |
| $\varphi$    | Coefficiente da classe de soldagem   |
| $V_{cordão}$ | Volume do cordão de solda, em $\text{mm}^3$  |
| $W$          | Variável aleatória para largura do filete  |
| $w$          | Largura do filete, em mm   |
| $z$          | Perna do filete, em mm   |
| $n/N$        | Relação de escala entre imagem do CCD e imagem armazenada nas direções horizontal e vertical |
| $z_{im}$     | Posição cartesiana ( $x_{im}, y_{im}$ ) na matriz de armazenamento, em pixels                |
| $z_{CCD}$    | Posição cartesiana ( $x_{CCD}, y_{CCD}$ ) na matriz CCD, em elementos CCD                    |

# SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>                                       | <b>18</b> |
| <b>1.1 - CONTEXTO .....</b>                                       | <b>18</b> |
| <b>1.2 - OBJETIVOS .....</b>                                      | <b>20</b> |
| 1.2.1 - Gerais .....  | 20        |
| 1.2.2 - Específicos.....  | 20        |
| <b>1.3 - ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....</b>                           | <b>21</b> |
| <b>2 - FUNDAMENTOS E REVISÃO DE LITERATURA .....</b>              | <b>22</b> |
| <b>2.1 - PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW E PROJETO DE JUNTAS .....</b>  | <b>22</b> |
| <b>2.1.1 - Parâmetros.....</b>                                    | <b>25</b> |
| 2.1.1.1 - Tensão elétrica de soldagem .....                       | 26        |
| 2.1.1.2 - Corrente elétrica de soldagem .....                     | 28        |
| 2.1.1.3 - Velocidade de soldagem e de alimentação do arame .....  | 30        |
| 2.1.1.4 - Ângulo da tocha .....                                   | 32        |
| 2.1.1.5 - Distância entre bico de contato e metal base.....       | 34        |
| 2.1.1.6 - Gás de proteção .....                                   | 36        |
| 2.1.1.7 - Ciclo de trabalho da fonte de soldagem .....            | 40        |
| 2.1.1.8 - Modos de transferência metálica.....                    | 41        |
| 2.1.1.9 - Estabilidade do processo de soldagem .....              | 44        |
| <b>2.1.2 - Projeto de junta.....</b>                              | <b>44</b> |
| 2.1.2.1 - Tipos de junta .....                                    | 45        |
| 2.1.2.2 - Tipos de chanfros .....                                 | 47        |
| 2.1.2.3 - Posições de soldagem.....                               | 48        |
| 2.1.2.4 - O cordão de solda.....                                  | 49        |
| 2.1.2.5 - Marcação do filete na prática .....                     | 60        |
| 2.1.2.6 - GMAW-S .....  | 61        |
| <b>2.2 - PROBABILIDADE CONDICIONAL .....</b>                      | <b>65</b> |
| <b>2.3 - FILOSOFIA DE BAYES .....</b>                             | <b>66</b> |
| <b>2.4 - ESPECIALISTA, INFERÊNCIA, MÃO DE OBRA E RISCOS .....</b> | <b>68</b> |
| 2.4.1 - Modelos: simples ou complexos? .....                      | 69        |
| <b>2.5 - MEDIÇÃO DA LARGURA DO CORDÃO DE SOLDA .....</b>          | <b>70</b> |
| <b>3 - METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>          | <b>76</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>3.1 - PLANEJAMENTO</b> .....                           | <b>76</b>  |
| <b>3.2 - METODOLOGIA</b> .....                            | <b>76</b>  |
| <b>3.2.1 - Projeto de junta</b> .....                     | <b>76</b>  |
| <b>3.2.2 - IRB 2000</b> .....                             | <b>81</b>  |
| <b>3.2.3 - Configuração do processo de soldagem</b> ..... | <b>82</b>  |
| <b>4 - DISCUSSÕES DE RESULTADOS</b> .....                 | <b>102</b> |
| <b>5 - CONCLUSÕES</b> .....                               | <b>106</b> |
| <b>5.1 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....       | <b>106</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....                                  | <b>108</b> |
| <b>APÊNDICE A</b> .....                                   | <b>113</b> |
| <b>APÊNDICE B</b> .....                                   | <b>116</b> |
| <b>APÊNDICE C</b> .....                                   | <b>118</b> |
| <b>APÊNDICE D</b> .....                                   | <b>120</b> |

# 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1 - CONTEXTO

A metalurgia encontra na soldagem a mais utilizada tecnologia na união de peças metálicas. Diferentes arranjos geométricos e perfis metálicos são imersos no mercado dia após dia nos diversos campos de atuação da engenharia. A gama de juntas projetadas exige grande flexibilidade nos processos de soldagem para alcançar os requisitos calculados. Fundamentalmente,

“Os projetos devem ser feitos especificamente para cada união, com o objetivo de obter a máxima economia, o critério irrevogável de aceitação. Qualquer sistema é aceitável por atender os requisitos de rigidez, força, vibração, fadiga, impacto ou aparência. O melhor deles, para qualquer propósito, é aquele que possui o máximo desempenho ao menor custo” (BLODGETT, p.1, 1963, tradução nossa).

Nesse contexto, a busca pelo conhecimento sobre a geometria do cordão de solda torna-se um universo vasto e de necessária investigação para atender os requisitos supracitados nos projetos de juntas.

A união de elementos perpendiculares é um dos arranjos mais comuns em soldagem, especialmente no campo da construção, com o aço estruturado, em tubulações, ou na fabricação de equipamentos. Esse tipo de junta em particular, junta de ângulo em 90° ou tipo T, suporta grande esforço e possui uma série de particularidades que um soldador deve conhecer, um amálgama entre configurações, padrões, regulamentos e melhores práticas de um determinado processo de soldagem. A sua utilização é vantajosa pelo menor número de partes envolvidas, conseqüentemente menor consumo de material, e redução no uso de oficina (TAMBOLI, 1999).

Chawla (1992) e Melton (1992) sugerem que qualquer soldador experiente consegue inferir sobre estabilidade e qualidade dos processos de soldagem através da visão e

audição, o que se estende ao projeto de junta tipo T. No entanto, a acuidade humana na inspeção de alguns parâmetros *a priori* e *a posteriori* do processo de soldagem, como manter constante a largura do cordão de solda em filete, ou avaliar se houve penetração total (CJP) ou parcial (PJP) do passe raiz, é reduzida ou nula, sem qualidade para comparação por considerar apenas a visão e audição do especialista. Mesmo com a utilização de cartas de controle, utilização de modelos matemáticos, probabilísticos, empíricos, ou outras metodologias de escolha de parâmetros de soldagem, existem imprecisões, erros e incertezas, sobre o resultado da soldagem, já que “todos os modelos estão errados; alguns modelos são úteis; todo modelo é uma aproximação” (BOX *et al.*, 2005, tradução nossa).

As variações na largura da poça de fusão, por exemplo, são inconstantes e ruidosas, com inúmeras incertezas associadas, seja de deformação da superfície medida com o pulsar da poça de fusão, ajuste e calibração relacionada à metrologia quando utilizada, erros de medição, histerese e paralaxe, escorrimento da poça de fusão devido ao gradiente de temperatura e forças atuantes, deformações, distorções e defeitos no metal base por excesso de calor em uma das partes soldadas, concavidade ou convexidade em demasia, entre outras.

O que pode ser feito é reduzir tais imprecisões. Conhecer a profundidade de um processo aplicado a um tipo de junta permite o uso da metrologia adequada, analisar e esclarecer os parâmetros fundamentais que contornam o processo de soldagem, com o intuito de encurtar a distância entre as insinuações teóricas do projeto de junta e o resultado prático do processo de soldagem. Fortuitamente, ter maior qualidade para a união especificada no projeto.

Na prática, o soldador, ou operador do programa de soldagem, estabelece os parâmetros de uma Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) para o passe de um cordão que atenda os critérios de qualidade (AWS, 2006). O processo continua até atingir os requisitos de projeto e dar o acabamento por usinagem ao cordão. Como propósito inicial, a soldagem ocorre, há união metálica. Há também provável uso em demasia de material de soldagem, retrabalho do operário e adição de novos processos de inspeção pós-solda para atender o projeto da junta. Na pior hipótese, ocorre a remoção do cordão e confecção de novo traçado como um novo projeto. No caminho contrário, processos de soldagem com

modelos mais próximos, com monitoramento e tecnologia adequada, e junta previamente analisada, possuem maior acuidade para garantir os requisitos de projeto. E o caminho natural é a busca da redução de custos, tempo no manuseio, inspeção, material e trabalho.

Nesse viés, a investigação aqui presente parte para o esclarecimento entre parâmetros de entrada do processo GMAW-S e a geometria do cordão de solda tipo filete encontrada em junta tipo T de aço classificado pela Sociedade de Engenheiros da Mobilidade (SAE) como 1020. A regra de Bayes é aplicada para traçar relações entre os parâmetros de entrada do processo de soldagem, os requisitos de projeto e o resultado do cordão de solda na junta. Dessa forma, analisam-se três variáveis de entrada no processo de soldagem que possam influenciar a junta tipo T projetada. Posteriormente, busca-se parear as relações desses parâmetros à geometria esperada do cordão, a partir do conhecimento *a priori* para a confecção da junta. A partir disso, espera-se traçar um conjunto de notações técnicas para facilitar a compreensão do universo delimitado.

## **1.2 - OBJETIVOS**

### **1.2.1 - Gerais**

Este trabalho busca esclarecer os requisitos de projeto da junta tipo T, soldada em filete, no intuito de estabelecer relações entre a geometria do cordão de solda e o processo GMAW-S, através da utilização da regra de Bayes que atenda os critérios de projeto. Esperam-se, com a aplicação da metodologia, resultados que obtenham parâmetros de tensão de soldagem, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação do arame com maior chance de serem selecionados para traçados de cordão de solda dentro dos valores de perna e garganta teórica requeridas no projeto da junta.

### **1.2.2 - Específicos**

- (a) Esclarecer critérios de projetos de junta tipo T;
- (b) Aplicar a regra de Bayes em valores médios de parâmetros do processo GMAW-S para a junta tipo T sem chanfro;

(c) Relacionar as variáveis pré-definidas do processo de soldagem à largura do cordão de solda. Posteriormente, apresentar a relação da largura do cordão de solda à perna, garganta teórica do filete, nas posições de soldagem 2F para junta tipo T.

### **1.3 - ORGANIZAÇÃO DO TEXTO**

Os cinco capítulos que constituem este trabalho contemplam o seguinte conteúdo:

O capítulo um fornece um breve escopo do trabalho, intenções e motivos que contornam a investigação.

O capítulo dois envolve os fundamentos teóricos e o cenário acadêmico do processo GMAW-S, juntas soldadas e a regra de Bayes.

O capítulo três foca nas considerações de laboratório, metodologia experimental, configuração da fonte de soldagem, programação do IRB2000, ferramentas utilizadas, e apresenta os resultados dos experimentos planejados.

O capítulo quatro tem a finalidade de discutir os resultados esperados e alcançados com a investigação.

O capítulo cinco finaliza o trabalho, e apresenta conclusões sobre a distribuição de valores para as variáveis de entrada para a obtenção da variável largura do filete através da metodologia utilizada.

## 2 - FUNDAMENTOS E REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 - PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW E PROJETO DE JUNTAS

Na busca de custos reduzidos de produção e maior previsibilidade de resultados de soldas pesquisadores vêm desenvolvendo e aprimorando os variados processos de soldagem. Entre o leque de processos de soldagem disponíveis, tem-se em *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) uma tecnologia de arco elétrico que contempla a coalescência do metal de adição consumível, sem revestimento e sólido, ao metal base. O então denominado eletrodo, ou arame sólido, é fundido pela energia gerada pelo arco elétrico para formar a poça de fusão, e, com o traçado da tocha e resfriamento do regime, o cordão de solda (AWS WHB, 1984; NORRISH, 1992; TIMINGS, 2008).

A alimentação do arame ocorre em velocidade contínua, com aplicação de corrente contínua e uso de eletrodo no polo positivo da fonte. Diferenças na polaridade no eletrodo afetam a transferência de calor (ALTHOUSE *et al.*, 2013; ROADKILL, 2013). O arame se movimenta sob a proteção de um gás contra oxidação e contaminação atmosférica vizinha ao arco elétrico, se funde ao metal base, e com o resfriamento da liga metálica formada há união das peças (AWS WHB, 1984; NORRISH, 1992; TIMINGS, 2008).

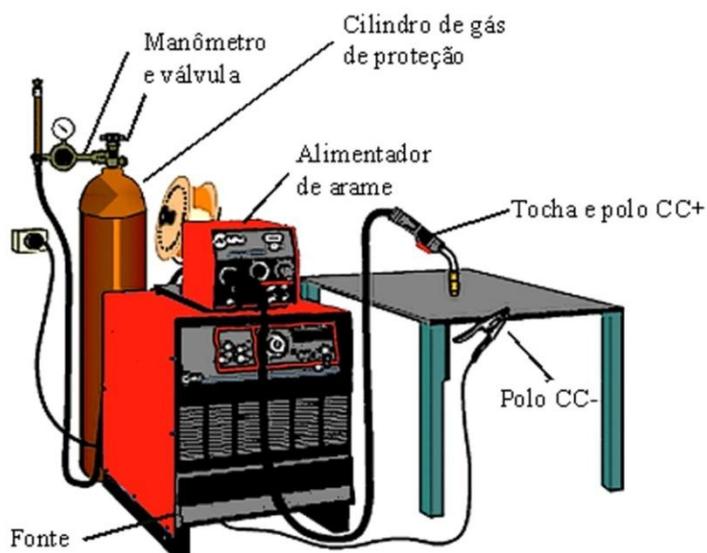


Figura 2.1 - Componentes do processo GMAW manual.

Essa alimentação contínua do arame está estreitamente ligada ao autoajuste de seu comprimento. A dinâmica do consumo do arame se deve à variação na corrente elétrica. Entre o arame e o metal base há elevada concentração de corrente elétrica, até 300 A/mm<sup>2</sup>. Tal comportamento aliado à alta velocidade de soldagem, à alta taxa de deposição de metal (calculada para cada diâmetro e WFS) e à simplicidade de automação garante uma gama de aplicações à GMAW. Dependendo da configuração, GMAW gera baixo aporte térmico e permite a utilização em metal base de pouca espessura, entre 0,5 e 2 mm, bem como o uso em todos os ângulos de ataque para a tocha de soldagem, sem limitar a aplicação em juntas de maior espessura (ALTHOUSE *et al.*, 2013; NADZAM *et al.*, 1995).

Tais características contribuem para fabricar uniões com grande penetração da poça de fusão e bom acabamento, evitando o uso de limpeza de escória, o que reduz o gasto com pós-tratamento do cordão, como Tratamento Térmico Pós-solda (PWHT) para alguns materiais, e, com arame de menor diâmetro e configuração adequada, estreitamento nas zonas termicamente afetadas, o que contribui para a manutenção das propriedades mecânicas do metal base.

O processo GMAW, no entanto, possui uma série de variáveis e considerações que aumentam a complexidade do seu uso. Variáveis como a velocidade de alimentação do arame, comprimento do eletrodo, distância entre tubo de contato e metal base (DCP), ângulo de ataque, ângulo de trabalho e vazão do gás são alguns exemplos que não estão presentes em outros processos e também precisam ser monitoradas pelo soldador (PARMAR, 1995). Partes adicionais, como o alimentador e a bobina de arame, precisam ser transportadas com a fonte de soldagem. Outra limitação é sua utilização em ambientes abertos, pois a corrente de ar pode atrapalhar a proteção do gás do eletrodo e provocar defeitos no cordão e instabilidade no arco elétrico. Além disso, por possuir maiores taxas de resfriamento da poça de fusão, pode-se afetar a qualidade global da solda (NADZAM *et al.*, 1995).

Adicionalmente a essas características, têm-se os parâmetros diretos e indiretos da solda que também devem ser de conhecimento do soldador. Segundo Naidu *et al.* (2003), os IWP comportam as configurações para trabalho que resultam nos DWP, como mostra a Figura 2.2. Entende-se por IWP aquelas variáveis de entrada do processo de soldagem, desde a definição, por exemplo, dos valores de tensão, a escolha do processo e material de adição,

quando houver, destinado a soldagem. O DWP inclui o produto das escolhas do IWP aplicadas ao processo de soldagem.

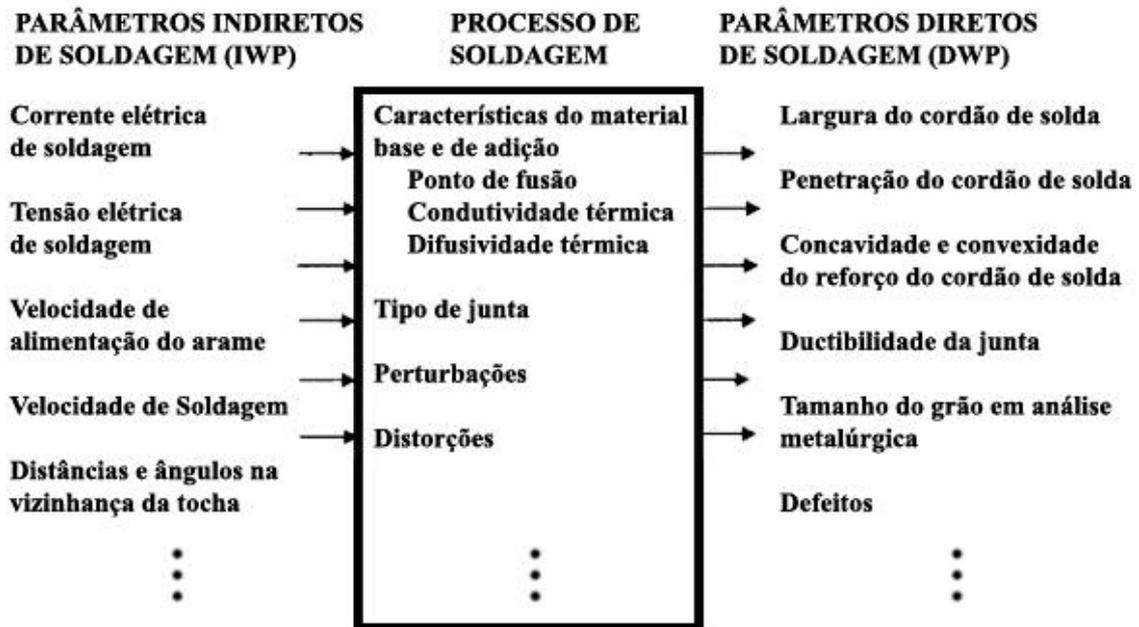


Figura 2.2 - Variáveis de entrada e saída em GMAW (modificado de Cook, 1981).

A configuração das variáveis de entrada no processo de soldagem guiam os tipos de transferência metálica em GMAW e afetam diretamente a geometria do cordão e a qualidade global da solda, pois alteram a penetração, altura e espalhamento do reforço, amplitude e granulometria metalúrgica nas zonas termicamente afetadas (ZTA), e largura da poça de fusão, ver Figura 2.3.

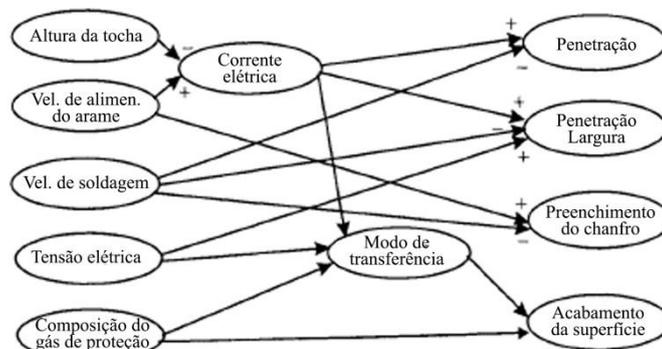


Figura 2.3 - Relação IWP e DWP em GMAW (modificado de NAIDU *et al.*, 2003).

### 2.1.1 - Parâmetros

O universo de variáveis apresentado na Figura 2.2, segundo Dornfeld *et al.* (1982), pode ser separado em três categorias: as que podem ser alteradas durante o processo, as que são definidas antes do processo e as que não podem ser alteradas.

As variáveis que podem ser alteradas durante o processo incluem a tensão de soldagem, a velocidade de alimentação do arame e a velocidade de soldagem. Os parâmetros que são definidos antes do processo incluem a polaridade eletrodo-metal base, composição e vazão do gás de proteção, ângulo de trabalho e deslocamento da tocha, distância entre bico de contato e metal base, classificação e tipo do eletrodo. Os parâmetros que não podem ser alteradas são composição e dimensões do metal base, configuração da junta (NAIDU *et al.*, 2003).

Para GMAW, a configuração adequada do conjunto de variáveis entre os IWP, dinâmica do processo de soldagem e DWP deve ser capaz de inserir energia necessária no sistema eletrodo-metal base para que haja fusão. A configuração adequada do arco elétrico responde por esse fenômeno. A ionização do gás de proteção rompe o dielétrico entre o eletrodo e o metal base, insere energia no sistema, com valores na faixa de 10 a 40 V, alcançando 1200 A (MODENESI, 2008). Tendo em vista que das três categorias, apenas uma pode variar durante o processo, entende-se que são estes os parâmetros mais relevantes para se alcançar o DWP desejado (NAIDU *et al.*, 2003).

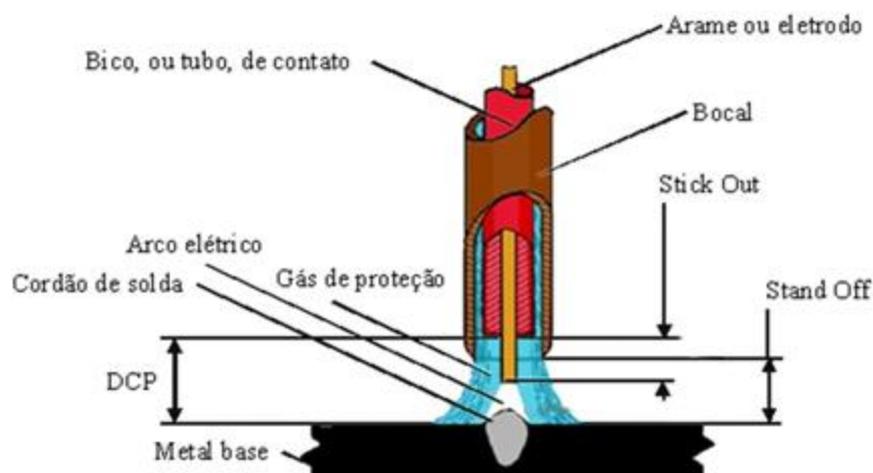


Figura 2.4 - Vizinhança da tocha em GMAW.

Algumas tecnologias de fontes de soldagem já armazenam configurações automáticas dos principais parâmetros para um dado processo de soldagem para um dado IWP. Computacionalmente, informam-se as entradas que não estão armazenadas na memória da fonte, como tipo e diâmetro do arame, tipo do gás de proteção e espessura do metal base entre outros. A partir disso, obtêm-se os valores de tensão, velocidade de alimentação do arame e a curva Volt por Ampère (V x A), como mostra a Figura 2.5.

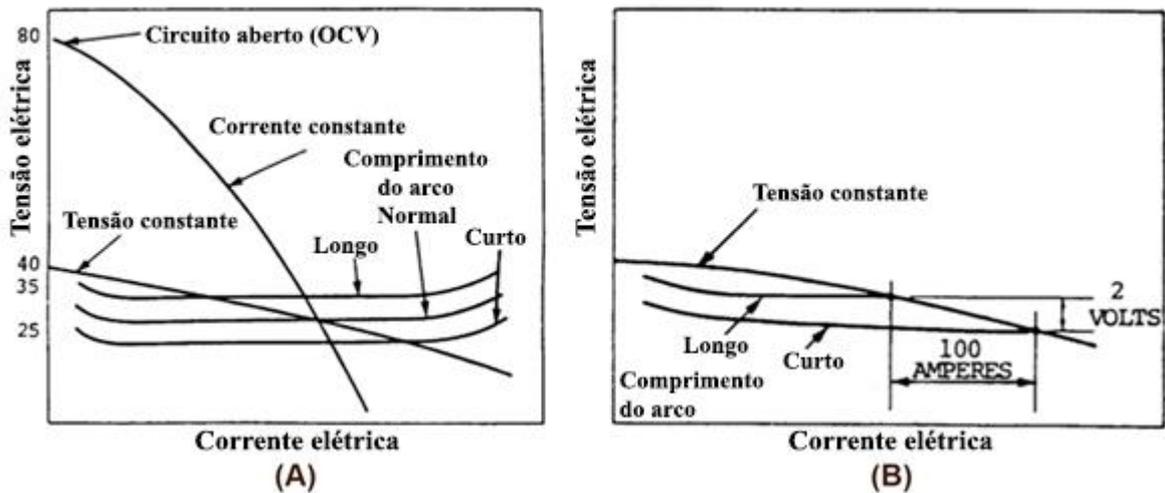


Figura 2.5 – Curvas características de fontes de soldagem, em (A) tensão e corrente constante, em (B) tensão constante (ROADKILL, 2013).

Esses e outros parâmetros a serem configurados para a utilização do processo de soldagem GMAW são apresentados a seguir, bem como suas particularidades, influências gerais no processo e no cordão de solda.

#### 2.1.1.1 - Tensão elétrica de soldagem

A tensão elétrica de soldagem tem relação direta com o aporte térmico do processo de soldagem GMAW e com o formato global do arco elétrico, seu comprimento e largura. A tensão de soldagem  $U_S$ , a tensão do arco elétrico  $U_A$  e a tensão do eletrodo  $U_E$  estão relacionadas de acordo com a Equação (2.1) (ADOLFSSON *et al.*, 1995).

$$U_S = U_A + U_E \quad (2.1)$$

Para um mesmo valor de corrente elétrica, tensões mais baixas implicam em cordões de solda mais estreitos e com maior penetração no metal base, ver Figura 2.6. Tal configuração possui grande utilização no modo de transferência por curto-circuito, estudado neste trabalho. A variação da tensão em descompasso com a faixa de operação de um dado modo de transferência implica em defeitos característicos, como aparecimento de porosidade no cordão de solda, sobreposição de camadas metálicas, salpicos e mordeduras (BARRA, 2003). Tensão de soldagem muito alta provoca descontrole do arco elétrico e turbulência da poça de fusão, o que conseqüentemente influencia na penetração do metal base. Tensão de soldagem muito baixa afeta a abertura do arco elétrico, seu controle e penetração da poça de fusão, além de aumentar a quantidade de respingos e a formação de um cordão de solda de reforço extremamente convexo, com falhas na adesão ao metal base em suas extremidades (WEMAN, 2003; AWS WHB, 1984).

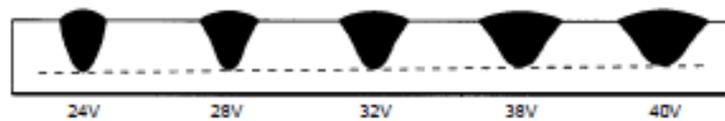


Figura 2.6 - Efeito da tensão elétrica na geometria do cordão (WEMAN, 2003).

Para dar-se início ao processo, a fonte de soldagem também possui uma tensão em vazio, tensão de circuito aberto (OCV). Por critérios de segurança o valor da tensão em aberto é limitado, porém varia de modelo para modelo de fonte de soldagem.

Apesar da Equação (2.1) descrever as tensões primárias envolvidas no processo, é sabido que são inúmeros elementos que provocam quedas de tensão entre a geração da energia pela fonte e a demanda do processo. Dessa forma, há diferença entre a tensão da fonte à monitorada no processo de soldagem. A tensão elétrica monitorada é a do arco elétrico, que soma a queda catódica, a queda na coluna e a queda anódica. Fatores como limpeza da peça e superfície a ser soldada, qualidade e posicionamento do pólo CC-, espessura da chapa a ser soldada entre outros, exigem maior tensão da fonte de soldagem para que o valor do processo esteja na faixa desejada.

### 2.1.1.2 - Corrente elétrica de soldagem

A corrente elétrica de soldagem é a variável mais importante na taxa de consumo do arame, por consequência no volume transferido para a poça de fusão e, dessa forma, a geometria final do cordão de solda, ver Figura 2.7.

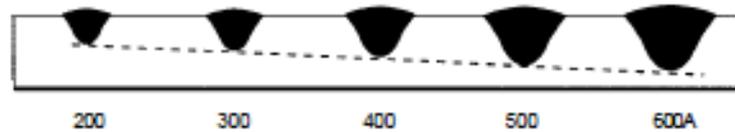


Figura 2.7 - Efeito da corrente elétrica na geometria do cordão (WEMAN, 2003).

A Equação 2.2 descreve a taxa de consumo do arame (em inglês *melting rate*,  $M_R$ ), de acordo com área da secção do arame ( $A_R$ , que depende diretamente do diâmetro), a corrente elétrica de soldagem ( $I_S$ ), o comprimento de *stick out* do arame ( $l_{out}$ ), a constante empírica  $\alpha_3$  (que envolve reações no anodo, a influência do gás de proteção, as características do eletrodo e polaridade do processo) e a constante empírica  $\beta$  (que envolve o aquecimento devido a resistência do eletrodo) (NORRISH, 1992; AWS WHB, 1984).

$$M_R = \alpha_3 \cdot I_S + \frac{\beta \cdot l_{out} \cdot I_S^2}{A_R} \quad (2.2)$$

A variação do parâmetro pode alterar o modo de transferência metálica. Um elevado valor da corrente elétrica de soldagem afeta diretamente a expansão da ZTA. Tal injeção de energia é responsável pelo brilho presente durante a soldagem. Para cada configuração de parâmetros de soldagem há uma variação particular do brilho emitido no processo. A corrente elétrica de soldagem, a distância entre o bico de contato e o comprimento do arame provocam variação na taxa de fusão do arame e na energia transferida para a poça de fusão, de acordo com o efeito Joule:

$$P = I_S^2 \cdot R_d \rightarrow P = \rho_e \frac{l_{out} \cdot I_S^2}{A_R} \quad (2.3)$$

Algumas fontes de soldagem permitem que a indutância do processo seja alterada. Essa variável, medida em henry no S.I., influencia diretamente no valor da corrente elétrica de

soldagem. Trata-se de uma corrente elétrica gerada por uma bobina próxima ao transformador da fonte. Tal bobina, através da passagem da corrente elétrica de soldagem gera indução magnética que cria uma corrente contrária à corrente elétrica de soldagem, no mesmo circuito, de maior ou menor intensidade, restringindo a mudança súbita de corrente elétrica que passa pelo transformador (ALTHOUSE *et al.*, 2013).

No caso de GMAW-S, esse parâmetro controla a taxa em que a corrente cresce ou reduz, ver Figura 2.8. Se a indutância for muito baixa, a ruptura do contato entre a poça de fusão e o arame pode ser violenta a ponto de gerar uma explosão. Isso resulta em muitos respingos e a vaporização de parte do material. Por outro lado, se a indutância for muito alta, o arame pode mergulhar na poça de fusão antes da fusão completa do arame. Assim, o processo é interrompido com o *bird's nest*, ou seja, com arame emaranhado, não fundido, sobre o metal de base e/ou na caixa do alimentador de arame (ALTHOUSE *et al.*, 2013).

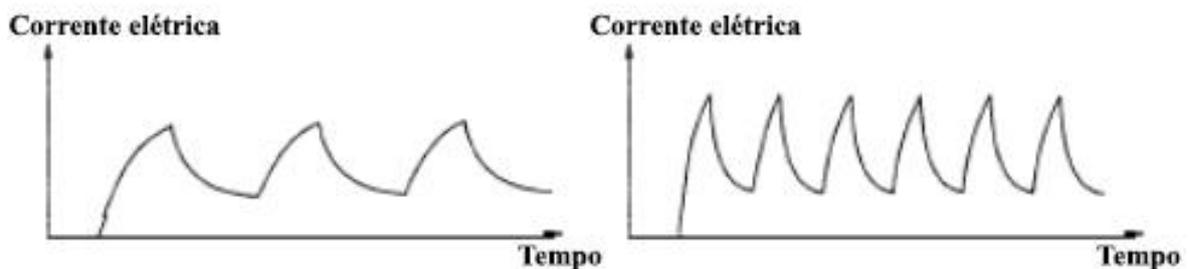


Figura 2.8 - Indutância, valor alto (esquerda) e baixo (direita) (WEMAN, 2003).

Máquinas para a soldagem GMAW possuem, em geral, um controle que permite ajustar a taxa de crescimento ou redução da corrente de soldagem e assim aprimorar a variação da corrente de soldagem para o modo de transferência em curto-circuito. Na fonte TransPuls Synergic 5000 CMT, por exemplo, essa operação é feita pelo parâmetro Dinâmico que varia de 0.0 a 10.0, com resolução de 0.1.

Não se utiliza corrente alternada em GMAW, pois o ciclo dessa forma de onda extinguiria o arco elétrico durante o processo. No entanto, a inversão da polaridade da fonte (arame em CC-), provoca instabilidade do arco, com deposição excessiva e irregular de material sobre o metal base e é reservado para projetos específicos (ALTHOUSE *et al.*, 2013; AWS WHB, 1984).

A configuração padrão do fluxo de corrente para soldagem em GMAW utiliza DCEP ou DCRP, ou seja, a polaridade positiva no eletrodo, com o metal base na polaridade negativa. Em alguns casos específicos é possível utilizar configuração DCEN ou DCSP, ver Figura 2.9, com a polaridade negativa no eletrodo, com o metal base na polaridade positiva, porém essas particularidades não serão tratadas nesse trabalho (ALTHOUSE *et al.*, 2013; AWS WHB, 1984).

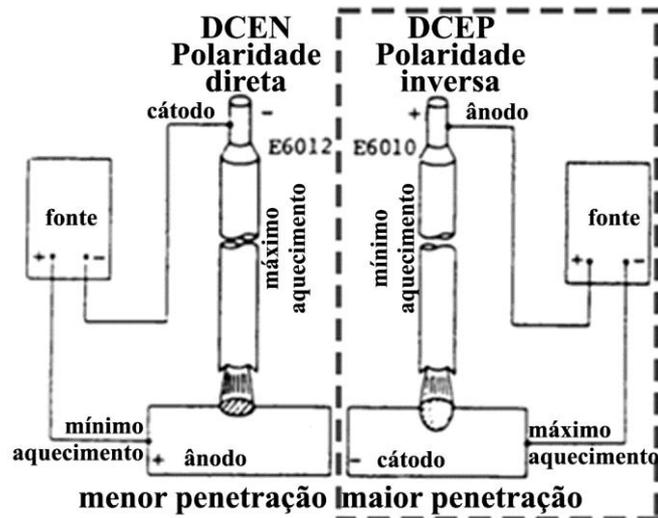


Figura 2.9 – Polaridade em DCEN e DCEP (modificado de ROADKILL, 2013).

### 2.1.1.3 - Velocidade de soldagem e de alimentação do arame

A velocidade de soldagem (em inglês *welding speed*) concentra ou distribui a transferência de metal e energia para o metal base, ver Figura 2.10, o que afeta a penetração, a geometria global do cordão de solda e o tamanho da ZTA (AWS WHB, 1984).

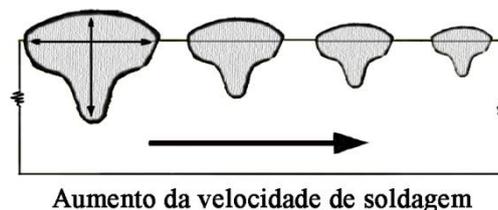


Figura 2.10 - Influência da velocidade de soldagem no cordão de solda.

Velocidades maiores provocam cordões estreitos e alta penetração no metal base, porém elevação exagerada desse parâmetro implica em geometria irregular do cordão com ondulações convexas, aparecimento de trincas de solidificação, irregularidades e falhas na adesão ao metal base nas extremidades do cordão de solda, conhecido como mordedura (em inglês *undercut*), como mostra a Figura 2.11 (AWS WHB, 1984).

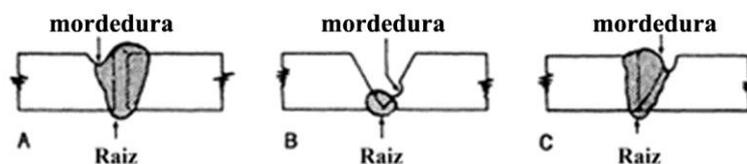


Figura 2.11 - Exemplificação de *undercut* em junta de topo.

Velocidade de soldagem muito baixa implica em demasiada transferência de metal e energia sobre o metal base, e conseqüentemente há um aumento excessivo da largura do cordão de solda com baixa penetração que, em superfícies de baixa espessura, pode causar perfuração (em inglês *burn through*) (WEMAN, 2003).

A velocidade de alimentação do arame controla a corrente elétrica de soldagem e conseqüentemente a penetração da poça de fusão no metal base. Valores elevados dificultam a abertura do arco elétrico. Podem também aumentar excessivamente a largura do cordão de solda e o número de respingos pelo curto-circuito frequente (AWS WHB, 1984).

Dependendo da espessura do metal base, a velocidade de alimentação do arame pode implicar em baixa penetração ou perfuração total da superfície. Valores baixos resultam em menor deposição de metal, estreitamento, concavidade e falha na adesão ao metal base nas extremidades do cordão de solda.

Em curto-circuito, a diferença de velocidade de alimentação e consumo do arame causa o mergulho do eletrodo. No instante que se toca a peça, há extinção do arco elétrico que determina a taxa de consumo do eletrodo. No instante seguinte, há o afastamento do eletrodo ao metal base, e os parâmetros retornam para restabelecer o arco (NORRISH, 1992).

#### 2.1.1.4 - Ângulo da tocha

Dois ângulos são preponderantes no posicionamento da tocha de soldagem: o de acesso ou trabalho (em inglês *torch work angle*), e o de ataque ou deslocamento (em inglês *torch travel angle*), ver Figura 2.12. O ângulo de trabalho, que está no plano transversal do cordão de solda, está mais voltado para o acesso da raiz da junta projetada, contido no intervalo de 35° a 90° por quadrante (WEMAN, 2003; TIMINGS, 2008).

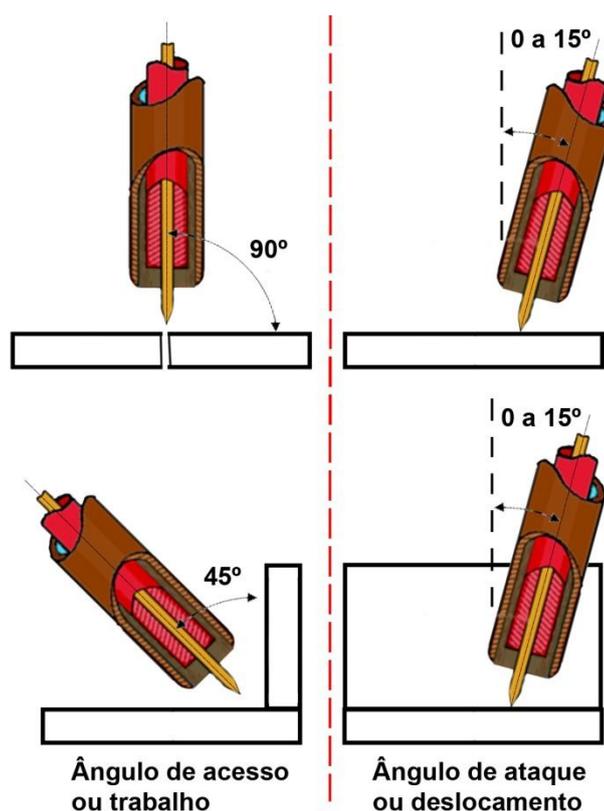


Figura 2.12 - Ângulo da tocha, de acesso ou trabalho, e de ataque ou deslocamento.

O ângulo de ataque, no entanto, está no plano da secção longitudinal do cordão de solda, ou seja, o mesmo plano da garganta teórica para filetes, com amplitude entre 0° e 15° em relação a vertical, e possui configuração positiva, neutra ou negativa (ver Figura 2.13) relativa à posição do bocal, com a tocha sobre, perpendicular ou contra a poça de fusão (WEMAN, 2003). Timings (2008) afirma que esse mesmo valor está compreendido entre 0° a 20°. Cada posição influencia diretamente a geometria global do traçado, como a simetria do cordão de solda, a penetração da poça de fusão e a geometria do reforço.

No caso de deslocamento negativo da tocha, ou seja, com o bocal sobre o cordão de solda, o arco voltaico e o gás de proteção pressionam o material depositado contra ao cordão de solda, o que implica em baixa penetração da poça de fusão, aumento da largura do cordão de solda e redução de oscilação da poça de fusão durante o processo.

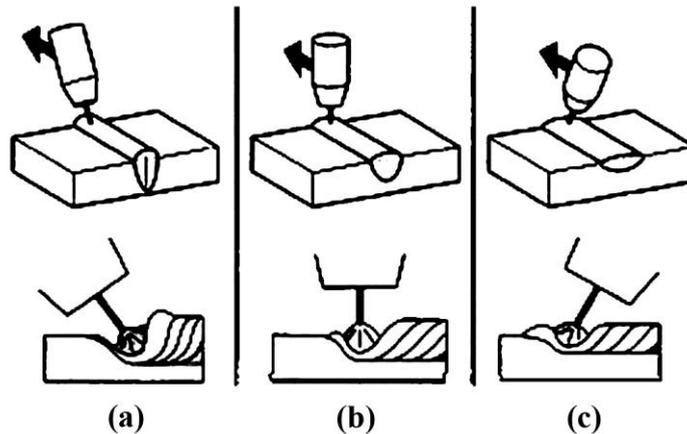


Figura 2.13 - Em (a) deslocamento positivo (*drag* ou *backhand*), em (b) perpendicular ou vertical, e em (c) negativo (*push* ou *forehand*) (WEMAN, 2003).

Para deslocamento positivo, ou seja, com o bocal contrário ao cordão de solda, o arco voltaico e o gás de proteção pressionam a poça de fusão na direção de formação do cordão de solda, o que implica em maior penetração da poça de fusão, geometria mais robusta com reforço convexo e redução da proteção do gás (WEMAN, 2003; AWS WHB, 1984).

A posição perpendicular, ou vertical, é a referência de geometria do cordão de solda e não exerce força adicional por pressão do gás de proteção ou arco voltaico sobre a poça de fusão.

Uma configuração semelhante de posicionamento da tocha é aplicada na soldagem de juntas. A junta tipo T em particular, exige a inclinação no entorno de  $45^\circ$  com o plano transversal à linha raiz da junta, para ter mais acesso ao metal base, ou mesa ou membro contínuo, e ao plano da alma, ou membro intercostal. Como boa prática, utiliza-se também inclinação levemente negativa, em torno de  $-15^\circ$  em relação a vertical, como ilustra a posição (c) na Figura 2.13. Essa configuração permite que o fluido aquecido esquente as duas partes da junta com isonomia, o que influencia diretamente a geometria do filete.

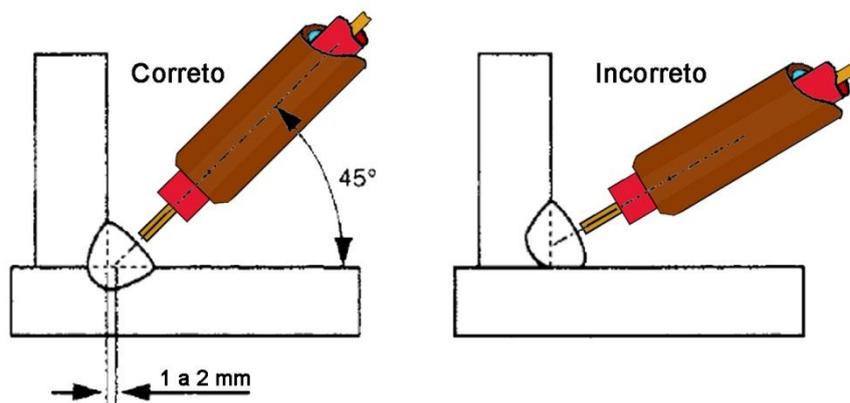


Figura 2.14 - Posicionamento angular adequado da tocha para soldagem de filete (modificado de WEMAN, 2003).

Segundo Weman (2003), a tocha deve projetar o eletrodo com um deslocamento de 1 a 2 mm da raiz da junta tipo T, como mostra a Figura 2.14. O propósito é compensar a elevada dissipação de calor pela condução nas duas partes soldadas e dar simetria ao perfil de penetração.

#### 2.1.1.5 - Distância entre bico de contato e metal base

A distância entre o bico de contato e o metal base, de sigla DCP em português, influencia diretamente a escolha do modo de transferência metálica (ver Figura 2.4). O bico de contato pode estar levemente projetado ou recuado no bocal da tocha, e possui relação estreita com o comprimento do arco elétrico e do arame (em inglês *stick out*).

Apesar da importância dessas distâncias na geometria da poça de fusão e da proteção adequada do gás, pouco é esclarecido sobre o assunto. Kim *et al.* (1995) estudaram a influência do CTWD, sigla em inglês, na geometria da poça de fusão e encontraram que há influência considerável, principalmente por afetar o comprimento do arco elétrico e a corrente elétrica de soldagem. Dreher *et al.* (2010) apresentam o estudo de escoamento do gás no bocal comumente utilizado em GMAW. Entretanto, relações entre CTWD, *stand off*, modos de transferência e vazão do gás possuem literatura detalhadas, o que implica em confusão sobre nomes de distâncias (CTWD e *stand off*, por exemplo) e configurações empíricas por parte do soldador, com imagens constantes de CTWD igual a *stand off*, ou seja, com o bico de contato nivelado ao bocal (ALTHOUSE *et al.*, 2013).

Quanto mais recuado o bico de contato em relação ao bocal, ou seja, quanto mais escondido estiver, maior será o *stick out* e conseqüentemente maior a oscilação de parâmetros durante o processo. Quanto mais projetado o bico de contato em relação ao bocal, ou seja, quanto mais à amostra estiver, mais concentrado fica o arco voltaico, maior a penetração da poça de fusão, maior a robustez e convexidade no reforço, e mais estreitos são os cordões (ALTHOUSE *et al.*, 2013).

O bocal mantém uma altura constante, ou *stand off*, em relação ao metal base para cada posicionamento do bico de contato e modo de transferência desejado. A distância entre o bico de contato e o metal base, ou CTWD, indica se o bico de contato está projetado ou recuado em relação ao bocal da tocha. Para cada tipo de transferência metálica, utilizam-se as configurações citadas, trabalhando, como regra geral, em uma faixa de 10 a 15 vezes o diâmetro do eletrodo. Deve ser mantido constante ao longo da soldagem e também influencia a geometria do cordão de solda, como mostra Figura 2.15 (NAIDU *et al.*, 2003).

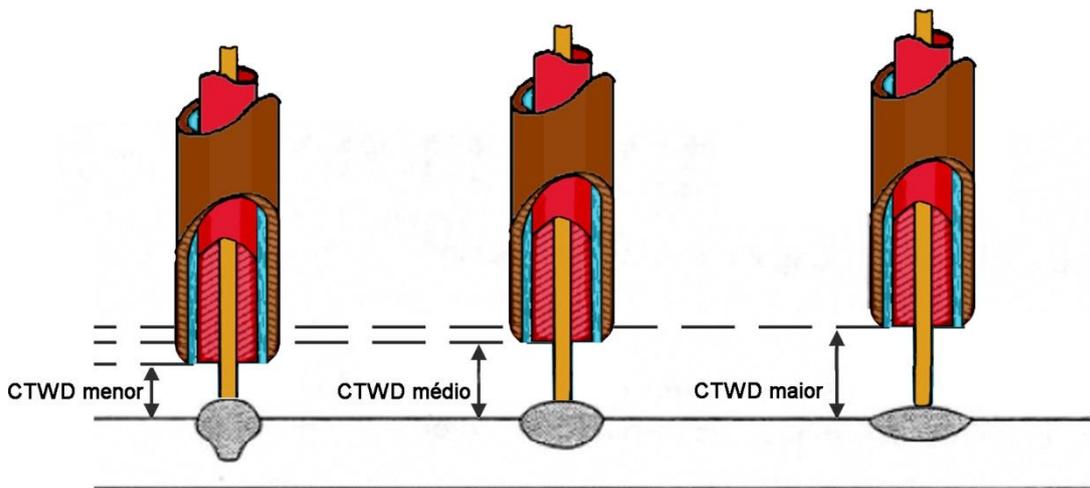


Figura 2.15 - Influência do CTWD na geometria do cordão de solda.

Em GMAW-S, por exemplo, o bico de contato pode estar projetado, com limite mínimo referenciado no bocal, configurado conjuntamente com *stand off* e *stick out* quando se quer ter mais acesso à uma junta a ser soldada.

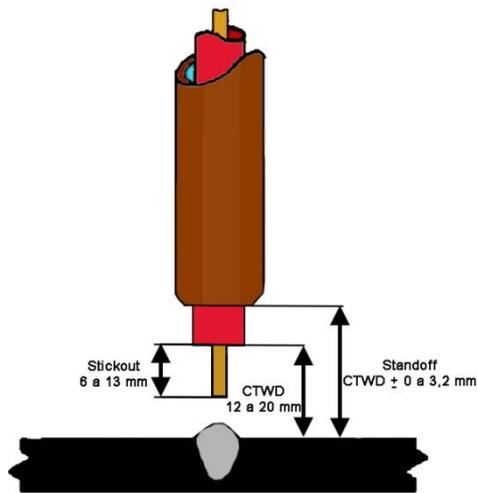


Figura 2.16 - Possível configuração para GMAW-S, CTWD menor que *stand off*.

A literatura, no entanto, não esclarece qual é a referência para essas distâncias quando há inclinação na tocha. Infere-se do posicionamento para junta de topo que a distância para uma junta tipo T, por exemplo, parte na direção do arame até o metal base.

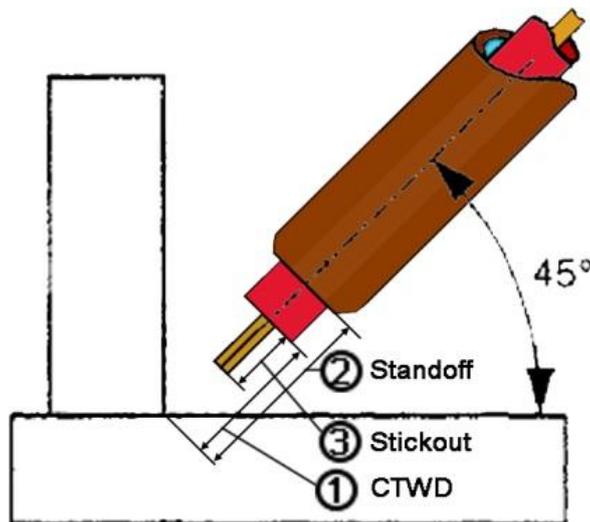


Figura 2.17 - CTWD, *stand off* e *stick out* para junta T.

#### 2.1.1.6 - Gás de proteção

Um dos elementos que influencia diretamente as características globais do processo GMAW é a composição do gás de proteção. A cobertura gasosa, além de proteger a

formação do cordão contra o ar atmosférico e facilitar a abertura do arco elétrico, possui forte influência no aspecto final do cordão de solda e na eficiência da transferência de energia do arco elétrico para o metal base.

O ar atmosférico é composto principalmente de oxigênio em torno de 20%, e nitrogênio em torno de 80%. Tais elementos são reativos e podem combinar aos metais envolvidos no processo de soldagem para o aparecimento de defeitos na solda.

A combinação de oxigênio aos metais forma óxido, como o monóxido de carbono que, provindo da presença de oxigênio na soldagem de ferrocabono, pode provocar porosidade no cordão de solda e dificultar a coalescência do arame e metal base, e, como consequência, impactar negativamente nas características mecânicas da solda, além de ser tóxico para o homem (ALTHOUSE *et al.*, 2013; AWS WHB, 1984).

O nitrogênio, em maior concentração no ar, tende a formar nitritos metálicos que, entre outros efeitos, aumenta a dureza no cordão de solda. O dióxido de nitrogênio, por exemplo, contribui para o surgimento de porosidade no cordão de solda e traz risco à saúde do soldador.

No geral, o gás de proteção influencia o modo de transferência metálica desejada, na geometria global do cordão de solda, na velocidade de soldagem devido à eficiência na transferência de energia do arco elétrico para o metal base, e por consequência os defeitos decorridos no processo de soldagem, como escória, deformação na secção transversal do metal base, entre outros (ALTHOUSE *et al.*, 2013; AWS WHB, 1984).

Em GMAW, para aplicação da solda em metais não ferrosos, utilizam-se gases inertes, puro ou combinado, como o Argônio (Ar) e o Hélio (He). Gases como o Oxigênio (O<sub>2</sub>), Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) e Nitrogênio (N<sub>2</sub>), por serem reativos, geralmente não são utilizados puros como gases de proteção. Cada gás, ou combinação de gases, é destinado a alcançar características específicas no processo de soldagem e são apresentados a seguir e na Figura 2.18. Mesmo que a vazão e o gás de proteção estejam fixados durante o processo de soldagem, a configuração adequada desses parâmetros reflete diretamente no cordão de solda (ALTHOUSE *et al.*, 2013; AWS WHB, 1984).

Argônio (Ar): gás inerte altamente ionizável, o argônio estreita o arco elétrico e aumenta a concentração de corrente elétrica de soldagem no processo. As consequências diretas na poça de fusão são maior penetração, estreitamento da largura e redução de respingos, aliada a utilização de menor tensão de soldagem. O peso específico é maior, se comparado ao hélio, e por isso utiliza-se menor vazão de gás de proteção no processo de soldagem. A contrapartida é a baixa condutividade térmica. Pode ser utilizado para soldagem de metais não ferrosos e ferroc carbono. No último caso, geralmente é utilizado em mistura com pequenas quantidades de CO<sub>2</sub> ou O<sub>2</sub>.

Hélio (He): gás inerte com alta condutividade térmica, o que contribui com a fusão mais acelerada do arame e a formação de reforço com maior volume, e conseqüentemente é utilizado em soldagem de metais base mais espessos. Essa mesma característica é bem aproveitada na soldagem de metais que a taxa de transferência de calor por condução facilita o resfriamento do metal base durante o processo de soldagem. No entanto, o hélio não ioniza tão facilmente e exige maiores valores de tensão de soldagem, o que provoca respingos durante o traçado do cordão. Outra contrapartida é possuir menor peso específico, o que implica em maior gasto de gás para a proteção da poça de fusão.

Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>): gás reativo com alta condutividade térmica e menor ionização, se comparado ao argônio, o que exige maior tensão de soldagem no processo, e conseqüentemente provoca poças de fusão mais largas e com maior penetração. O peso específico é elevado, exige menor vazão volumétrica para se ter boa cobertura da poça de fusão. Seu uso acarreta maior definição do contorno do cordão de solda e reduz a deformação na secção transversal do metal base. O diferencial do CO<sub>2</sub> é o custo reduzido se comparado aos gases inertes. No entanto, recomenda-se a utilização de ventilação para soldagem com esse gás puro, já que uma fração apresenta-se na forma de CO que aumenta o comprimento do arco elétrico, além de ser tóxico.

Oxigênio (O<sub>2</sub>): gás reativo extremamente oxidante que deve ser utilizado em combinação com argônio, principalmente para solda de ferroc carbono. Em baixas concentrações, entre 1 e 5% de O<sub>2</sub>, essa mistura produz poças de fusão mais fluidas, o que reduz a ocorrência de respingos, com contorno destacado e redução de deformação na secção transversal do metal base. O oxigênio coopera para a estabilidade do arco, entretanto, é natural que

provoque oxidação da superfície do cordão de solda, mesmo que não comprometa as características mecânicas da união.

Nitrogênio (N<sub>2</sub>): gás reativo substituto de mercado do hélio, com propriedades semelhantes, geralmente utilizado em combinação com argônio na proporção Ar 70% e N<sub>2</sub> 30%.

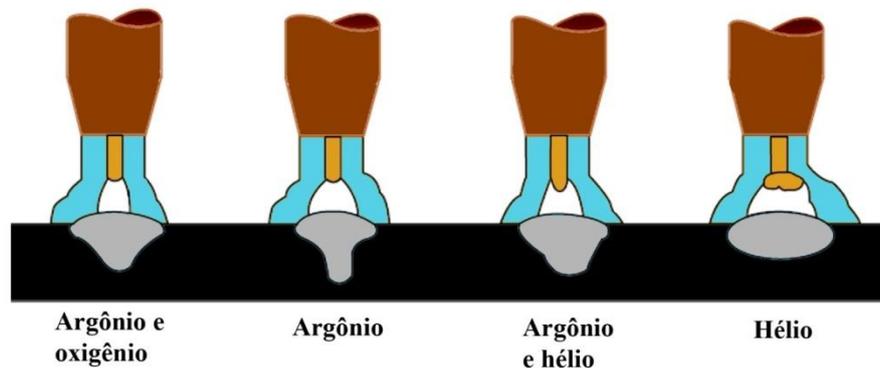


Figura 2.18 - Influência geral da escolha do gás na geometria global da poça de fusão (modificado de ALTHOUSE *et al.*, 2013).

Além da composição do gás de proteção, outro fator que deve ser analisado é a cobertura que o gás está oferecendo para o cordão de solda. A vazão adequada de gás de proteção deve possuir a quantidade essencial para o traçado do cordão de solda, sem haver desperdício por emissão exagerada de gás. De forma empírica, utiliza-se um valor elevado de vazão, como 40 l/min, com redução do valor até encontrar o momento que há corrosão no cordão. A medida ótima é a vazão limiar superior ao valor encontrado de corrosão. Caso o valor de corrosão seja 12 l/min, sugere-se utilizar de 13 l/min.

Outra influência é o tipo de escoamento do gás de proteção, ver Figura 2.19. Alguns bocais auxiliam o escoamento do gás de proteção, de turbulento para laminar, e aprimoram a cobertura do cordão de solda durante o processo. Dessa forma, há redução de consumo de gás e melhoria de proteção com o gás concentrado sobre o arco elétrico.



Figura 2.19 - Da esquerda para a direita, bocal e difusor do tipo *gas lens*, e bocal padrão, respectivamente, ambos utilizados em TIG.

A vazão do gás depende do tamanho do bocal utilizado em GMAW, e geralmente varia entre 4 e 40 l/min, geralmente utilizado entre a faixa de 7 a 12 l/min (PARMAR, 1995).

#### 2.1.1.7 - Ciclo de trabalho da fonte de soldagem

Não é exatamente um parâmetro para ser configurado durante o processo de soldagem, porém o desconhecimento do ciclo de trabalho da fonte, ou *duty cycle*, afeta negativamente o desempenho e a vida útil do equipamento, e o planejamento do processo.

As características estáticas e dinâmicas da fonte afetam diretamente a estabilidade do arco elétrico. Uma fonte de tensão constante, comumente utilizada em GMAW, possui um tempo de trabalho, ou tempo de operação, que afeta o processo. O ciclo de trabalho, discriminado em porcentagem, geralmente entre 20% e 100%, descreve por quanto tempo a fonte gera energia para um dado trabalho em uma dada configuração. A partir desse valor, é possível estimar o tempo possível para executar a soldagem e o tempo de pausa para resfriamento da fonte. Por exemplo, considerar ciclo de trabalho com parada de 10 minutos, utilizando 40% do tempo (equivalente a 6 min) a 500 A, ou seja, a fonte pode trabalhar 6 minutos gerando 500 A e depois deve dar uma pausa de 10 minutos. Desconsiderar essas recomendações implica em superaquecimento do sistema elétrico da fonte, o que pode provocar falha nos componentes elétricos.

A Associação Nacional de Fabricantes Elétricos (NEMA), por exemplo, possui uma norma que descreve sobre ciclos de trabalho e equipamentos elétricos de soldagem, a *EW-1 Electric Welding Apparatus*.

#### 2.1.1.8 - Modos de transferência metálica

Como foi dito, o processo de soldagem GMAW possui uma série de parâmetros que influenciam a formação do cordão de solda. A combinação de alguns desses parâmetros também influencia a forma como o material de adição é incorporado ao metal base, além de permitir avaliar a estabilidade do processo de soldagem, a quantidade de respingos e perda de material de adição, a qualidade global do cordão de solda traçado, e as possibilidades dadas ao operador da ferramenta quanto aos ângulos de utilização.

Norrish (1992) e Ponomarev *et al.* (2009) classificam os modos de transferência metálica quanto à ocorrência ou não do toque do arame na poça de fusão, ou seja, quando há mergulho (em inglês *dip transfer*), ou queda livre (em inglês *free-flight transfer*), durante a deposição de metal de adição ao metal base.

No modo de transferência em queda livre, o metal de adição se desprende do eletrodo e se desloca na coluna de gás protetor até alcançar o metal base. Esporadicamente pode ocorrer imersão do eletrodo na poça de fusão. No entanto, isso não ocorre com uma frequência regular, ou de forma proposital.

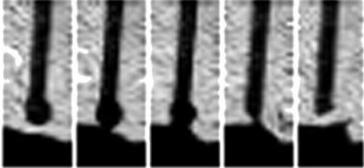
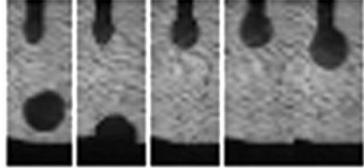
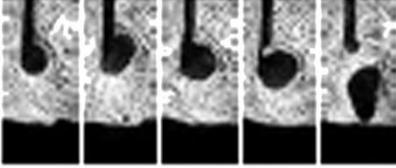
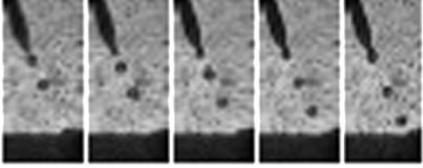
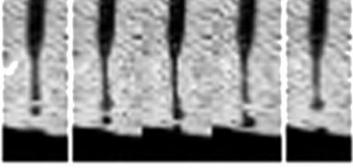
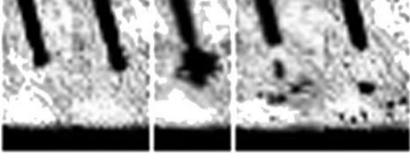
No modo de transferência em mergulho, e mais relevante para este trabalho, ocorre o toque e imersão do eletrodo no metal base em uma fração de segundo. O material fundido no eletrodo se desprende e é arrastado para a poça de fusão pela força de tensão superficial ali presente, pela força gravitacional e pelo solavanco magnético, ou *pinch force*, induzida pela corrente do processo. Recomendado para soldagem de juntas de chapas finas (inferior a 1/8 pol.), soldagem em todos os tipos de posição da tocha e para preenchimento de passe-raiz de grandes dimensões (ROADKILL, 2013).

Sob essa ótica, tem-se como modos de transferência predominantes estáveis o globular, o curto-circuito, o goticular ou spray, e o pulsado. Ponomarev *et al.* (2009) classificam também as transições entre alguns dos modos predominantes, de acordo com a variação do

comportamento da deposição devido às faixas de tensão e corrente elétrica de soldagem. O modo globular repelida, goticular projetada, goticular com alongamento, goticular rotacional ou explosiva estão entre os rótulos da subclassificação como mostra a Tabela 2.1.

O comportamento da transferência metálica influencia diretamente a luminescência do arco elétrico, fenômeno que influencia o monitoramento em tempo real da largura do cordão de solda abordado no tópico 2.5 - . Com exceção do curto-circuito, não há extinção do arco elétrico durante a deposição do metal de adição ao metal base. Assim, a radiação luminosa torna-se um ruído que satura a imagem da poça de fusão e compromete muito o monitoramento da dinâmica do processo de soldagem na vizinhança da poça de fusão (FRANCO, 2007; KOIKE *et al.*, 1999).

Tabela 2.1 - Classificação e subclassificação dos modos de transferência metálica GMAW (modificado de LOPERA, 2010).

| Classificação                              | Modo de transferência metálica | Comportamento  |
|--|--------------------------------|--|
| Mergulho ou <i>dip transfer</i>            | Curto-circuito                 |    |
| Queda livre ou <i>free-flight transfer</i> | Globular                       |    |
|  | Globular repelida              |  |
|  | Goticular projetada            |  |
|  | Goticular com alongamento      |  |
|  | Goticular rotacional           |  |
|  | Explosiva                      |  |

### 2.1.1.9 - Estabilidade do processo de soldagem

A variabilidade na frequência de curto-circuito, a ocorrência de curtos-circuitos momentâneos que não provocam transferência metálica, e a extinção repetitiva do arco elétrico durante o processo caracterizariam, para estabilidade do arco elétrico, que GMAW-S é um processo instável. No entanto, Carvalho (1997) reforça a subjetividade em se conceituar estabilidade do processo de soldagem e aponta que a própria regularidade dessas supostas características de instabilidade permite a inferência de GMAW-S como um processo estável e viável, já que a estabilidade do arco elétrico não indica estabilidade no comportamento dinâmico da poça de fusão.

Assume-se para esse trabalho a condição de estabilidade do processo de soldagem, e não exclusivamente do arco elétrico, os aspectos de qualidade na geometria do filete, atendimento aos requisitos de projeto de junta tipo T e ocorrência mínima de respingos.

### 2.1.2 - Projeto de junta

O projeto da junta exige uma análise crítica sobre o posicionamento do metal base, acessibilidade à tocha e à inspeção, e o preparo físico-químico do material que será soldado. O projeto de junta precisa ser avaliado quanto à gestão do escopo, prazo, o custo, a qualidade, os recursos humanos, a comunicação, o risco, as aquisições e a integração de todos os pilares. No geral, resume-se o projeto nos seguintes quesitos (BLODGETT, 1963; AWS D1.1, 2006; TIMINGS, 2008; MACHADO, 2011):

- Definir o tipo (tensão, compressão, flexão, carga estável, súbita ou variável), a magnitude, a direção e o sentido dos esforços a serem recebidos na junta;
- Se há fadiga ou estresse causado por impacto na união das peças;
- Risco de defeitos e avaliação de quais deles pode-se evitar, mitigar, transferir ou aceitar;
- O custo de preparo da junta;
- A eficiência da junta, ou seja, quão resistente é a solda se comparada ao metal base.
- A comunicação entre projeto e execução da solda;

O projeto de conexões envolve uma relação estreita entre ciência e arte. São diversas filosofias que podem ser utilizadas na concepção da junta, aplicação das forças, disponibilidade de tecnologia, custos, recursos, produtividade do processo etc.

### 2.1.2.1 - Tipos de junta

A combinação das especificações conjuntas de tal análise permite projetar inúmeros tipos de juntas para receber a solda. Quatro tipos básicos delas são amplamente conhecidos: de topo (em inglês *butt joint*), de ângulo (em inglês *corner joint*), sobreposta (em inglês *lap joint*), e de aresta (em inglês *edge joint*) (TIMINGS, 2008; WEMAN, 2003; AWS WHB, 1984), como mostra a Figura 2.20.

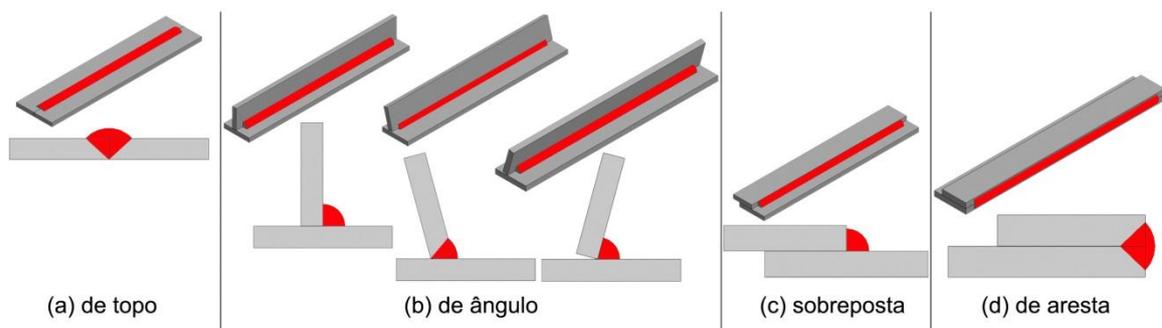


Figura 2.20 - Tipos básicos de juntas soldadas, vista em perspectiva e corte transversal (modificado de TAMBOLI, 1999 e TIMINGS, 2008).

Diz-se junta de topo quando há alinhamento no mesmo plano das partes soldadas. Caso estejam sujeitas à inclinação, seja em forma de L, em forma de T, ou outro ângulo entre as superfícies do metal base, nomeia-se junta de ângulo. Para juntas de ângulo com peças perpendiculares, utiliza-se comumente o nome junta tipo T. A junta entre a aresta de uma peça e a superfície de outra, configuração peça sobre peça, é denominada sobreposta. Também destinada para partes no mesmo plano, mas com propósito diferente da junta de topo, tem-se a junta de aresta.

A combinação metal base e material de adição determinar o *matching*, ou seja, o plano de ação dos esforços ao longo da junta. Um dos critérios de projeto é determinar que o metal de adição seja menos resiliente que o metal base e dessa forma, os esforços são calculados

em distribuição uniforme ao longo do plano da garganta teórica do filete. Para um metal de adição mais resiliente que o metal base, os esforços deslocam-se para as extremidades da união, concentrando-se nas áreas termicamente afetadas (AWS D1.1, 2006).

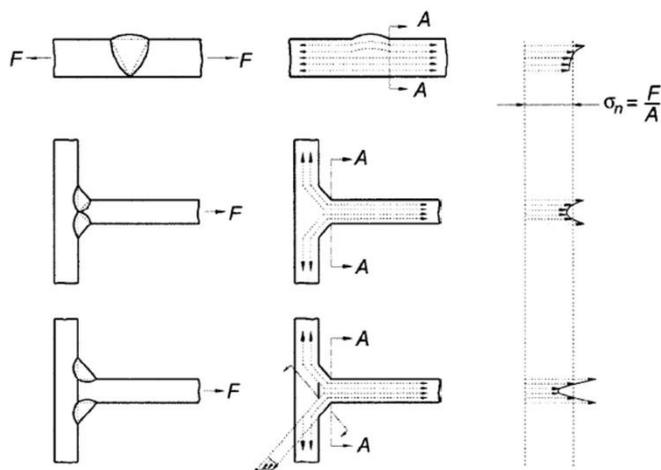


Figura 2.21 – Exemplos de distribuição de esforços (WEMAN, 2003).

Utiliza-se no projeto de junta tipo T a grandeza da perna do perfil do cordão de solda para calcular o tamanho do filete. É no valor da garganta teórica, porém, que se calcula os esforços da junta, exemplificados na Figura 2.21. Para junta tipo T, é possível utilizar soldagem em filete, *plug/slot*, *spot/projection*, brasagem e em chanfro reto, 60°, J, V curvado (AWS WHB, 1984).

O passe da raiz inicia a soldagem das partes preparadas e influencia diretamente a penetração da solda. Seu traçado acompanha e preenche a abertura da raiz, ou *gap*. Para alguns projetos de juntas, apenas o passe da raiz é suficiente para a união das partes. Outros casos incluem passes consecutivos a partir do passe da raiz. Traçados assim são exigidos para o total preenchimento da junta, dependendo da espessura do metal base, seja em movimento retilíneo, como o de um cordão simples, ou duplo oito, ou triangular, ou *stringer bead*, ou ziguezague (em inglês *weave bead*) ou outros perfis de tecimento (NADZAM *et al.*, 1995; AWS D1.1, 2006; TIMINGS, 2008), como mostra a Figura 2.22.

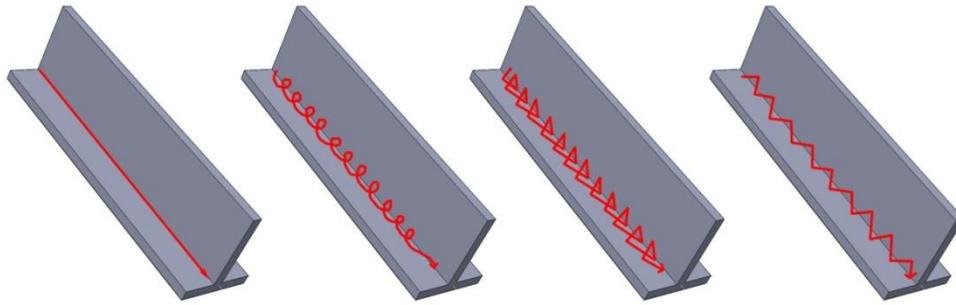


Figura 2.22 - Exemplos de movimentação do eletrodo, sem ou com tecimento.

### 2.1.2.2 - Tipos de chanfros

A configuração das juntas com chanfro provoca traçados bem diferenciados para o cordão de solda. O perfil dos chanfros é variado, ver Figura 2.23, e influencia diretamente na forma como a união é estabelecida, conseqüentemente na forma como o metal base acomoda entre as juntas e a geometria do cordão de solda (TAMBOLI, 1999).

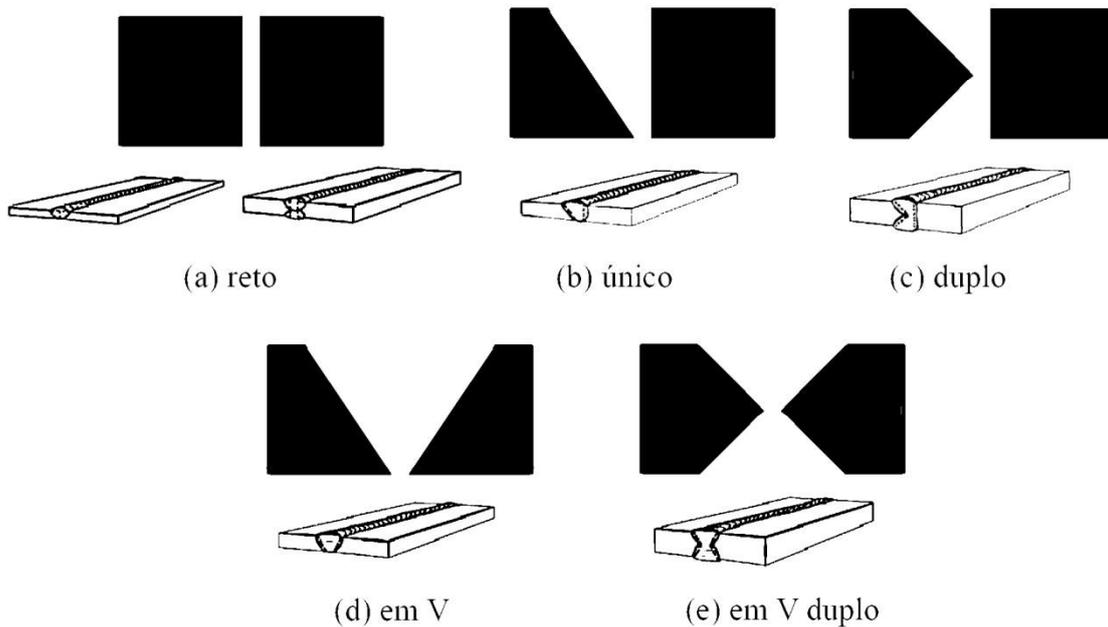


Figura 2.23 - Tipos comuns de chanfros para o projeto das juntas (modificado de GREGORY *et al.*, 2005 e AWS A3.0, 2010).

A abertura da raiz, facilmente visualizada no chanfro reto, é geralmente determinada pelo diâmetro do eletrodo utilizado e, conseqüentemente, do tipo do metal base e do posicionamento da solda. Utilizar o valor adequado para o *gap* influencia diretamente na

dimensão profundidade do cordão de solda. Para solda em filete, as peças devem estar o mais próximo possível, não devendo exceder *gap* de 3/16 pol. ( $\approx 4,7625$  mm). Se houver *gap* de até 1/16 pol., esse valor deve ser acrescido no tamanho do filete (TAMBOLI, 1999).

### 2.1.2.3 - Posições de soldagem

Duas categorias determinam faixas de posicionamento de soldagem: para teste e para produção. As posições para teste, ou posições padrão, são classificadas de acordo com a norma, por exemplo, ASME e EN ISO 6947, nas quais há correlação. As posições de teste utilizam uma nomenclatura para facilitar o entendimento do posicionamento para teste do metal base a ser soldado. Na norma ASME, a letra G é utilizada para junta com chanfro e a letra F para junta em filete. Para chapas não tubulares, uma numeração dita a posição de soldagem, sendo 1 no plano, 2 na horizontal, 3 na vertical e 4 sobrecabeça. Para soldagem orbital, configurações adicionais são permitidas. Para a norma EN ISO 6947, a nomenclatura utiliza PA, PB, PC, PD, PE, PF e PG para abreviar as posições de soldagem, como explica a Figura 2.24.

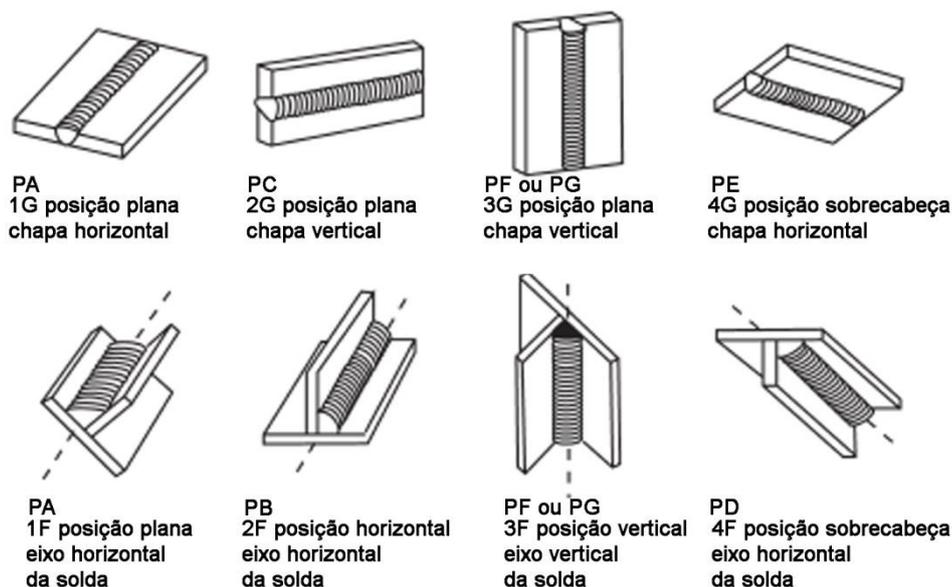


Figura 2.24 - Posições de soldagem.

As posições de teste são posições discretas, com faixas de tolerâncias definidas, de  $\pm 15^\circ$  para desvio longitudinal e  $\pm 5^\circ$  de desvio transversal ao cordão, com intenção principal de contribuir com a avaliação e qualificação de soldadores. Durante o processo produtivo de soldagem, no entanto, ângulos fora da tolerância de teste são necessários, indefinidos pelas posições dessas normas. Relações entre posições de teste e produção podem ser encontradas nos códigos de construção ASME IX QW-461.1 e QW-461.2, ver Figura 2.25.

**QW-461.2 POSIÇÕES DE SOLDAGEM  
SOLDA EM FILETE**

| <b>Tabulação de Posições de Solda em Filete</b> |                              |                                     |                                    |
|---|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| <b>Posição</b>                                  | <b>Posição de referência</b> | <b>Inclinação do eixo, em graus</b> | <b>Rotação da face, em graus</b>   |
| <b>Plana</b>                                    | <b>A</b>                     | <b>0 a 15</b>                       | <b>150 a 210</b>                   |
| <b>Horizontal</b>                               | <b>B</b>                     | <b>0 a 15</b>                       | <b>125 a 150<br/>210 a 235</b>     |
| <b>Sobre cabeça</b>                             | <b>C</b>                     | <b>0 a 80</b>                       | <b>0 a 125<br/>235 a 360</b>       |
| <b>Vertical</b>                                 | <b>D</b><br><b>E</b>         | <b>15 a 80</b><br><b>80 a 90</b>    | <b>125 a 235</b><br><b>0 a 360</b> |

Figura 2.25 - Exemplo de tradução entre posição de teste e produção (modificado de ASME, 2013).

#### 2.1.2.4 - O cordão de solda

Outras configurações também afetam a geometria do cordão, como o ângulo de trabalho da tocha e a velocidade de resfriamento da poça de fusão. O segundo caso, a taxa de resfriamento, influencia a largura, por exemplo, de cordões de solda com elevado valor de reforço, com deposição de muita massa do arame, e alto aporte térmico. O desdobramento dessa combinação é uma massa concentrada em coalescência e aquecida, que tende a escorrer e acomodar sua geometria até que o resfriamento a solidifique. Em GMAW-S, no entanto, há baixo aporte térmico e rápido resfriamento, o que permite a medição da largura do cordão de solda bem próxima da largura da poça de fusão.

Variáveis como o coeficiente de expansão térmica do metal base e o número de restrições no posicionamento da junta influenciam a distorção, o aparecimento de trincas e as tensões residuais na solda da junta.

A secção de um cordão de solda contempla três parâmetros que definem a geometria global da solda, com o reforço, a penetração e a largura, ou distância entre margens, como mostra a Figura 2.26.

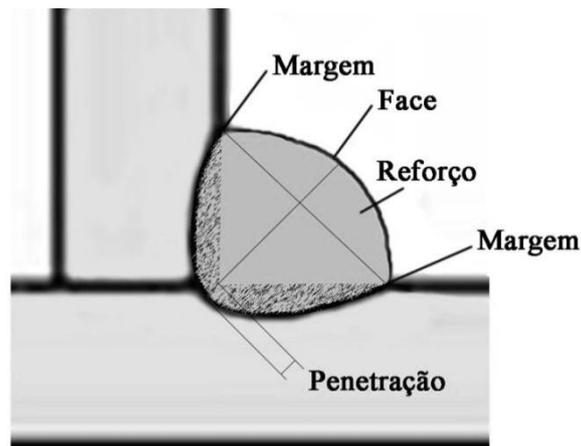


Figura 2.26 - Nomenclatura da geometria do cordão de solda.

Duas macrocategorias definem a geometria do cordão de solda em relação à secção e à junta: solda em chanfro (*groove*) e em filete (*fillet*). A junta em chanfro pode ser do tipo penetração total (CJP) ou penetração parcial (PJP), como mostra a Figura 2.27. Cordões em PJP ou filete são preferenciais em relação ao custo devido ao menor volume de material depositado (AWS D1.1, 2006) . Em geral, filetes menores e mais longos são equivalentes em capacidade a filetes maiores e curtos, e custam menos pela quantidade de material depositado, pelo número de passes e pelo tempo do processo (TAMBOLI, 1999).

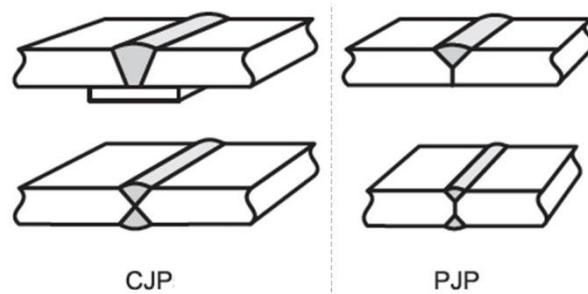


Figura 2.27 - Penetração total e parcial em junta com chanfro.

É válido lembrar que nem todas as juntas necessitam de alta penetração do cordão de solda. De acordo com o AWS D1.1, filetes simples não exigem que a penetração siga além da raiz, pois a fusão até a raiz garante capacidade suficiente para aquela junta, ver Figura 2.28.

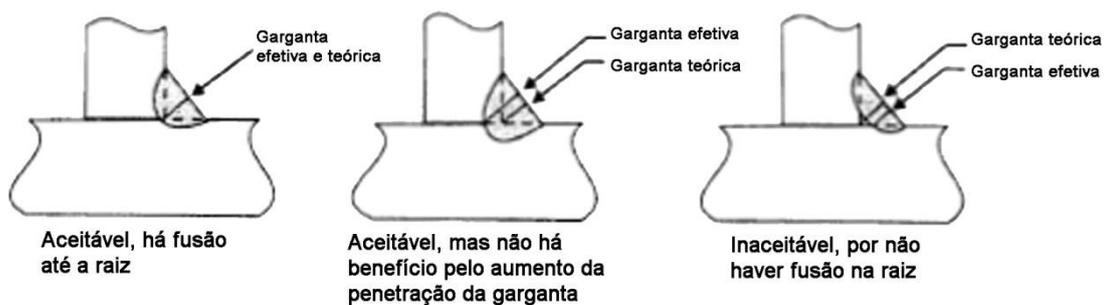


Figura 2.28 - Requerimentos de penetração para solda em filete de junta tipo T (modificado de TAMBOLI, 1999).

A nomenclatura também utiliza as seguintes definições de pontos relevantes na secção do cordão (TAMBOLI, 1999).

- Chanfro: superfície geralmente angular, em uma ou ambas as partes e faces, que recebe o cordão de solda. Pode estar entre a faixa de 30 a 60 graus, ou possuir curvatura na forma de bisel, V, J, U, K ou outras geometrias para propósitos especiais de solda e custos.
- Face: superfície aparente do cordão ao término do traçado.
- Garganta efetiva: distância entre o ponto médio da raiz à face da solda.
- Garganta teórica: distância entre o ponto médio da raiz à linha de ligação entre as margens. Essa dimensão forma o plano mais frágil da solda ao longo do cordão. Por

estar mais distante da área de fusão no metal base e a alma, tem muita relevância no projeto de junta.

- Margem: limiar entre a junção entre a face da solda com o metal base. A largura do cordão de solda é medida através da distância entre duas margens.
- Perna: distância entre a margem e o ponto médio da raiz da solda.
- Raiz: parte posterior da solda que intercepta a superfície oposta do metal base. Em uma corte de secção é visualizada como um ponto, uma linha, ou uma área, dependendo do projeto da junta. A abertura da raiz geralmente tem a dimensão igual ao diâmetro do arame utilizado para GMAW.

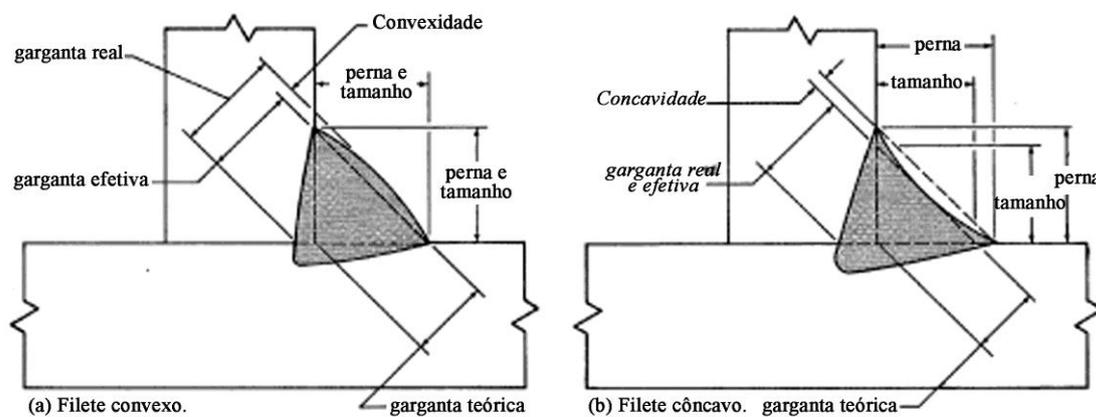


Figura 2.29 – Parâmetros do filete (modificado de AWS WHB, 1984).

Um bom cordão de solda possui um reforço mínimo suficiente para garantir que o perfil projetado seja preenchido. Excesso ou carência de deposição influencia a convexidade do perfil, ver Figura 2.29, e está diretamente ligado ao projeto da junta e custo do cordão traçado. Para soldas em filete em junta tipo T, a convexidade de um cordão de solda de dada largura não pode exceder os seguintes valores apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Convexidade máxima (modificado de AWS D1.1, 2006).

| Largura do cordão ou da face – W                | Convexidade máxima |
|---|--------------------|
| $W \leq 5/16$ pol. (8 mm)                       | 1/16 pol. (2 mm)   |
| $W > 5/16$ pol. (8 mm) até $W < 1$ pol. (25 mm) | 1/8 pol. (3 mm)    |
| $W \geq 1$ pol. (25 mm)                         | 3/16 pol. (5 mm)   |

A partir da análise da Tabela 2.2 é possível inferir que o reforço não é desejável por critérios de projeto, por ser um concentrador de fadiga, comumente usinado. Ele é desejável, porém, para contornar defeitos na geometria do filete. De acordo com o código AWS D1.1 (2006), espera-se que os perfis em juntas tipo T estejam nos intervalos mostrado na Figura 2.30.

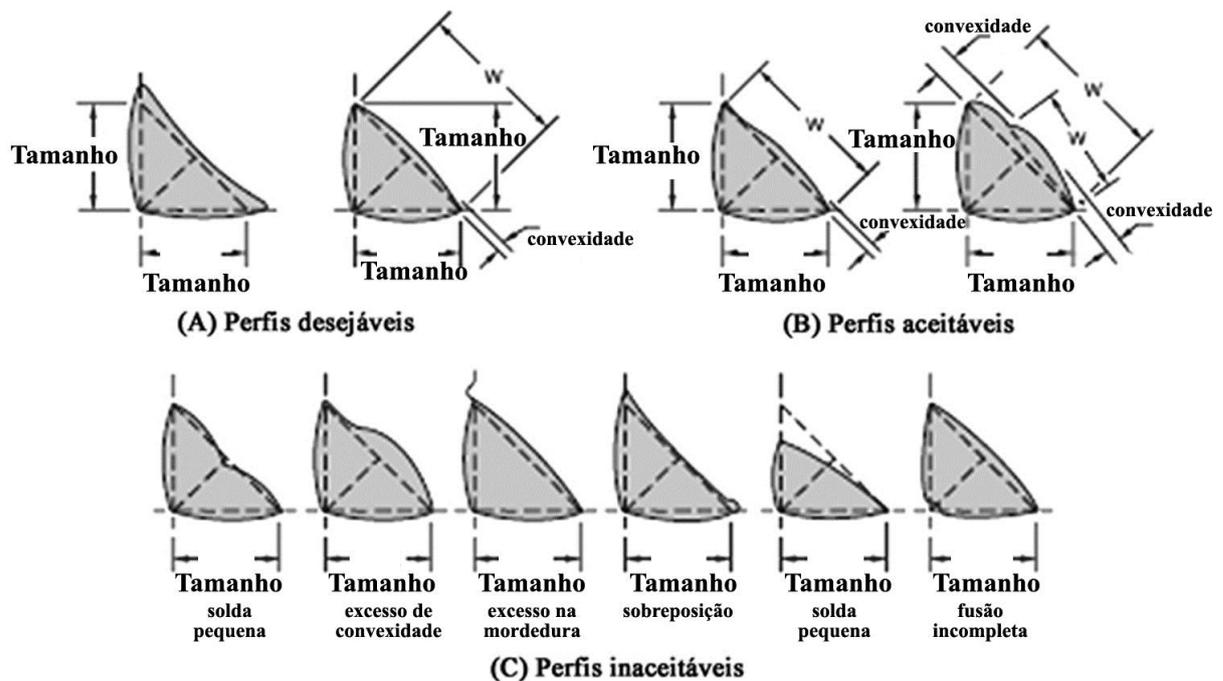


Figura 2.30 - Perfis esperados de filete em junta tipo T (modificado de AWS D1.1, 2006).

Caso o projeto necessite de mais resistência aos esforços, um cordão multipasse pode ser traçado para reforçar o filete. A quantidade de passes está, no entanto, diretamente relacionada à distorção angular da junta.

Como foi dito, a variação dos parâmetros indiretos do processo de soldagem, o *gap* entre as chapas e o posicionamento do metal base influenciam a geometria global do cordão e altera a forma como a poça de fusão irá se depositar. O preparo adequado do metal base a ser soldado também influencia na eficiência, sequência e produtividade da solda. Outros impactos envolvem os defeitos de geometria e qualidade no cordão, provindos do processo e/ou dos parâmetros diretos e indiretos do processo de soldagem (AWS WHB, 1984).

Um dos métodos mais utilizados no projeto de junta considera que, conhecendo as cargas externas, têm-se as tensões distribuídas uniformemente ao longo da garganta do cordão de solda (TAMBOLI, 1999; BLODGETT, 1963). Os critérios de projetos utilizados nos experimentos consideram que:

- a) Cargas externas utilizam valores nominais;
- b) O cordão de solda é homogêneo, isotrópico e elástico;
- c) As partes soldadas são rígidas.

Dessa forma, desprezam-se as tensões residuais, concentração de tensões e deformações entre solda e peça, o que aumenta a complexidade do cálculo do projeto da junta. Este trabalho não considera esforços atuando sobre a junta tipo T. A variação na geometria do filete tem o intuito de associar parâmetros de soldagem aos requisitos de projetos da junta.

Dado um filete em junta tipo T, o perfil do cordão é tratado como triângulo retângulo. Tem-se no dimensionamento dos catetos o cálculo da área da secção, e posteriormente, o volume de material despendido naquele projeto. Para encontrar o menor volume de material gasto com o cordão, tem-se:

$$V_{\text{cordão}} = \frac{\text{cateto 1} \cdot \text{cateto 2}}{2} \cdot L_{\text{cordão}} \quad (2.4)$$

$$\text{cateto 1} = \frac{\text{garganta}}{\cos \theta} \quad \therefore \quad \text{cateto 2} = \frac{\text{garganta}}{\sin \theta} \quad (2.5)$$

Substituindo (2.5) em (2.4), tem-se:

$$V = \frac{\text{garganta}^2}{2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta} \cdot L_{\text{cordão}} \Rightarrow V = \frac{\text{garganta}^2}{\sin 2\theta} \cdot L_{\text{cordão}} \Rightarrow$$

$$V = \frac{\text{garganta}^2}{2 \cdot \text{tg } \theta} \cdot L_{\text{cordão}} (1 + \text{tg}^2 \theta) \quad (2.6)$$

Considerando:

$$\text{tg } \theta = \frac{\text{cateto 1}}{\text{cateto 2}} \Rightarrow \text{tg } \theta = x \quad (2.7)$$

Substituindo (2.7) em (2.6) e derivando, tem-se:

$$\frac{dV}{dx} = 0 \Rightarrow \frac{\text{garganta}^2}{2} \cdot L_{\text{cordão}} \left( \frac{2 \cdot x^2 - 1 - x^2}{x^2} \right) = 0 \Rightarrow 1 - \frac{1}{x^2} = 0 \therefore x = 1 \quad (2.8)$$

O volume mínimo de material necessário para o projeto de um cordão é alcançado com um filete de pernas iguais. A Figura 2.31 mostra a relação calculada entre o volume do filete e a razão entre as pernas do filete, para uma dada garganta e comprimento do cordão de solda.

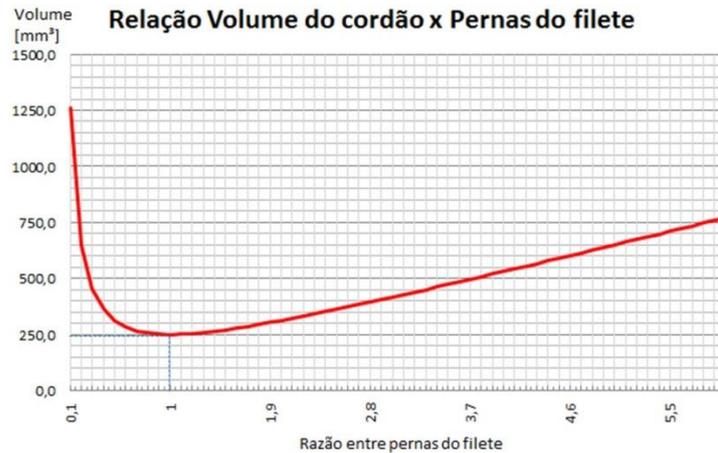


Figura 2.31 - Relação para o menor volume de filete.

Considerando um filete de pernas iguais, pode-se aproximar o perfil do cordão de solda a um triângulo retângulo isósceles, de catetos  $l$  (ou  $S = l$  para filete convexo, ou  $S \neq l$  em filete côncavo), hipotenusa  $w$ , a altura máxima do reforço  $r_e$  e a garganta teórica  $t$ , com relação direta pelo teorema de Pitágoras.

$$w^2 = l^2 + l^2 \Rightarrow l = \frac{w}{\sqrt{2}} \text{ e } t = \frac{S}{\sqrt{2}} \quad (2.9)$$

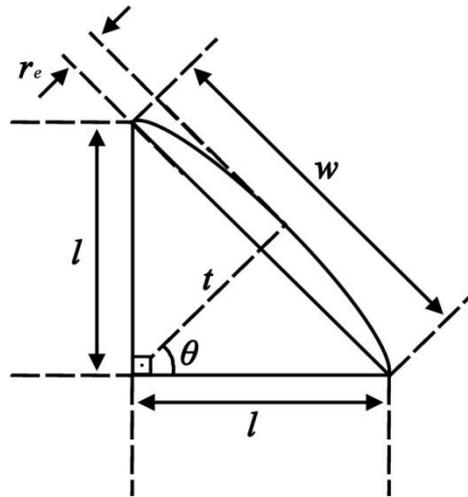


Figura 2.32 - Geometria considerada para o filete.

Dois métodos são utilizados para cálculo de esforços em projetos de estruturas, o Coeficiente de Projeto para Carga e Resistência (em inglês *Load and Resistance Factor Design*, LRFD), e o Projeto da Tensão Admissível (em inglês *Allowable Strength Design*, ASD), ver Figura 2.33, cujas diferenças são mais filosóficas e de critérios de projeto, e sobre como contornar as incertezas associadas à solda, às características do material soldado, à localização da solda, à função da estrutura e à atuação de esforços. Tanto o ASD e LRFD, de acordo com Instituto Americano da Construção em Aço (em inglês *American Institute of Steel Construction*, AISC), ainda são empregados (QUIMBY, 2008).

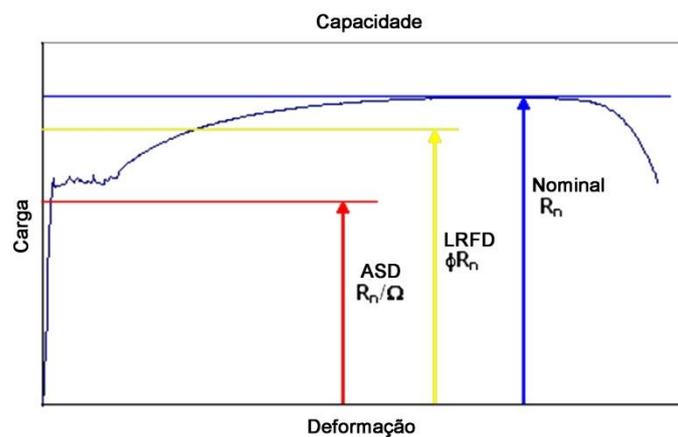


Figura 2.33 - Diferença na capacidade de carga em aço carbono para ASD e LRFD. (modificado de QUIMBY, 2008)

Fundamentalmente, o ASD considera que o somatório dos esforços de carga morta (em inglês *dead load*, DL) e de carga viva (em inglês *live load*, LL) devem ser menor ou igual à resistência nominal ( $R_n$ ), dividido por um fator de segurança (FS ou  $\Omega$ ), como descreve a Equação (2.10).

$$\sum DL + \sum LL \leq \frac{R_n}{\Omega} \quad (2.10)$$

A ASD é dita como uma abordagem simplista que considera fundamentalmente o fator de segurança como o único corretor da capacidade da estrutura para os esforços, (vide APÊNDICE A). A abordagem LRFD distribui as incertezas de cada parcela que compõe o projeto nos coeficientes  $\eta$ ,  $\gamma$  e  $\phi$  da Equação (2.11), em que  $\phi$  é o fator de resistência,  $\gamma$  são os fatores das cargas, e  $\eta$  o modificador das cargas relacionado a ductilidade do material ( $\eta_D$ ), à redundância ( $\eta_R$ ), e à importância de operação ( $\eta_I$ ), como descrevem as Equações (2.12) e (2.13).

$$\eta(\sum \gamma_{DL} DL + \sum \gamma_{LL} LL) \leq \phi R_n \quad (2.11)$$

$$\eta = \eta_D \cdot \eta_R \cdot \eta_I \geq 0,95 \quad (2.12)$$

$$\eta = \frac{1}{\eta_D \eta_R \eta_I} \leq 1,05 \quad (2.13)$$

Entende-se que a força da junta vai depender da resistência do material que a compõe e da área onde há solda na junta, ou seja, da resiliência da junta à tensão, medida em psi (libra-força por polegada quadrada), Pa (Pascal ou Newton por metro quadrado). Para cargas estáticas, se o produto da área soldada pela resistência à tensão da solda for superior à carga aplicada, a conexão é suficiente. Sabendo que a resistência à tensão de uma solda é dada pelo processo e pelo material de adição, resta entender a área que compõe a conexão da junta.

Para o projeto do filete, assume-se que a garganta é a dimensão na qual os esforços da junta são aplicados. Por se tratar do plano mais distante da área fundida com o metal base e alma, os cálculos de esforços aplicados à garganta entendem que, se há resistência nessa região, o gradiente de esforços projetados ao longo do perfil do filete estará dentro da resistência do cordão de solda. Isso é válido se o metal de adição possuir capacidade menor ou igual ao metal base. Caso o metal de adição da solda tenha maior capacidade que o

metal base, a influência dos esforços deixa de atuar no plano da garganta, e pode chegar a atuar nas regiões onde a metalurgia do metal está afetada, como as ZTA (TAMBOLI, 1999).

Considerando tensão ou cisalhamento aplicado na junta tipo T, calcula-se a garganta do filete a partir da razão da força ( $F_t$ ) pelo comprimento da solda ( $L_{\text{cordão}}$ ) (TAMBOLI, 1999). O valor resultante, dividido pela capacidade da solda, ou capacidade corrigida por um fator de segurança ( $\sigma_k$ ), gera o valor da garganta ( $t$ ). Uma análise dimensional deve ser feita de acordo com sistema de unidades utilizado para cada grandeza.

$$t = \frac{F_t}{\sigma_k \cdot L_{\text{cordão}}} \quad (2.14)$$

A solda em filete não considera compressão como um fator de projeto desde que as peças que compõem a junta tenham uma superfície de apoio. Em caso de torção, umas das técnicas considera o cordão de solda como uma linha, sem necessidade de se preocupar com a área, e por isso não é abordado neste trabalho.

Com o valor da garganta definido, tem-se a dimensão das pernas do filete através da Equação (2.9). Acrescido o dado comprimento do cordão, do processo de soldagem escolhido, pode-se iniciar o indicativo de projeto da solda, através dos símbolos apresentados na Figura 2.34 e norma EN ISO 2553.

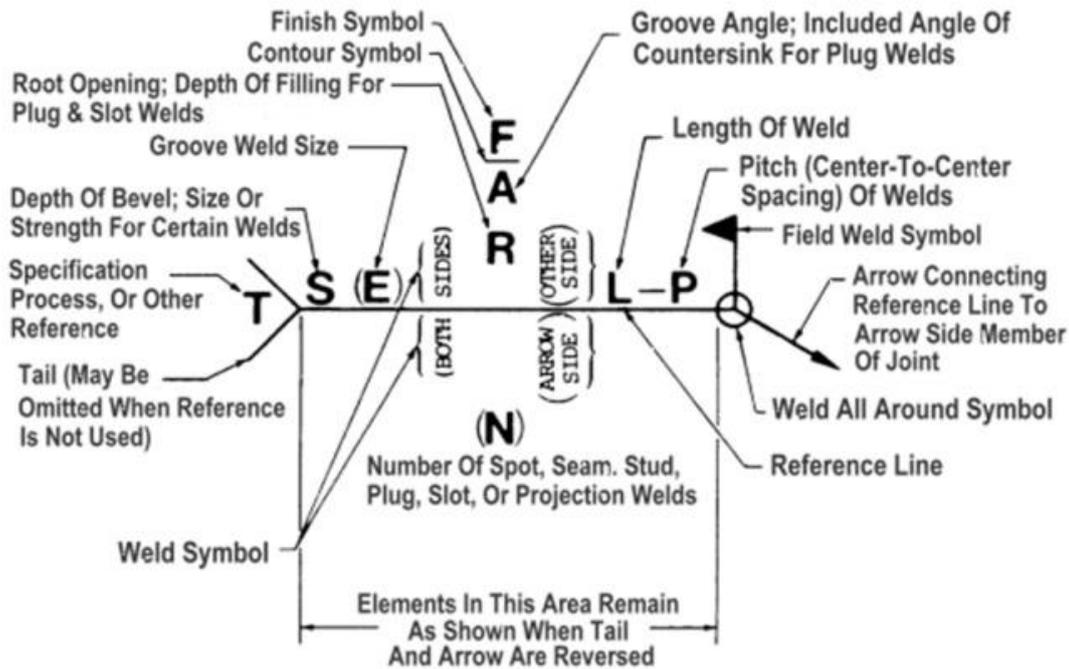


Figura 2.34 - Localização dos elementos e símbolos de soldagem (ISO 2553, 2013).

Tem-se na Figura 2.34 uma linha de referência, uma seta, os símbolos de soldagem e chanfro, as dimensões da solda, detalhes adicionais sobre o processo e outras informações. No campo T, por exemplo, pode-se ter a classe de soldagem, B, C e D, de acordo com a norma EN ISO 5817, de acordo com o tipo de carga.

O projeto da junta tem na Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) a comunicação entre projeto e operação da solda de fato. Trata-se dos detalhes que o soldador precisa conhecer para realizar a solda conforme projeto. Tamboli (1999) cita que uma EPS deve ter, no mínimo, as seguintes informações sobre a soldagem: processo utilizado (GMAW, GTAW, SMAW etc), especificação do eletrodo (AWS A5.1, A5.20 etc), classificação do eletrodo (E7018, E71T-1 etc), diâmetro do eletrodo (1,2 mm; 5/32 pol.), características elétricas (AC, DC+, DC-), especificação do metal base (padrão SAE, ANSI etc), temperatura mínima de pré-aquecimento e entre passes, corrente elétrica ou velocidade de alimentação do arame, tensão elétrica, velocidade de soldagem, posição, tratamento pós-solda, gás de proteção e vazão, e projeto da junta. Além disso, é importante que a WPS seja pré-qualificada e qualificada, ou seja, que seus parâmetros sejam abordados e aprovados pelo AWS D1.1 e que os testes ratifiquem as informações para uma WPS final.

### 2.1.2.5 - Marcação do filete na prática

Soldadores e serralheiros utilizam um artifício prático para a demarcação das linhas limítrofes para o filete. Através dos requisitos de projeto para um filete, usa-se a dimensão da perna para especificar o diâmetro da pedra cilíndrica abrasiva, ou rebolo (ver Figura 2.36), de uma retífica reta, como mostra a Figura 2.35. Com um rebolo de diâmetro adequado, utiliza-se a retífica para traçar as linhas guias do filete, definidas pelo desgaste do metal base nos pontos que tangenciam a pedra.

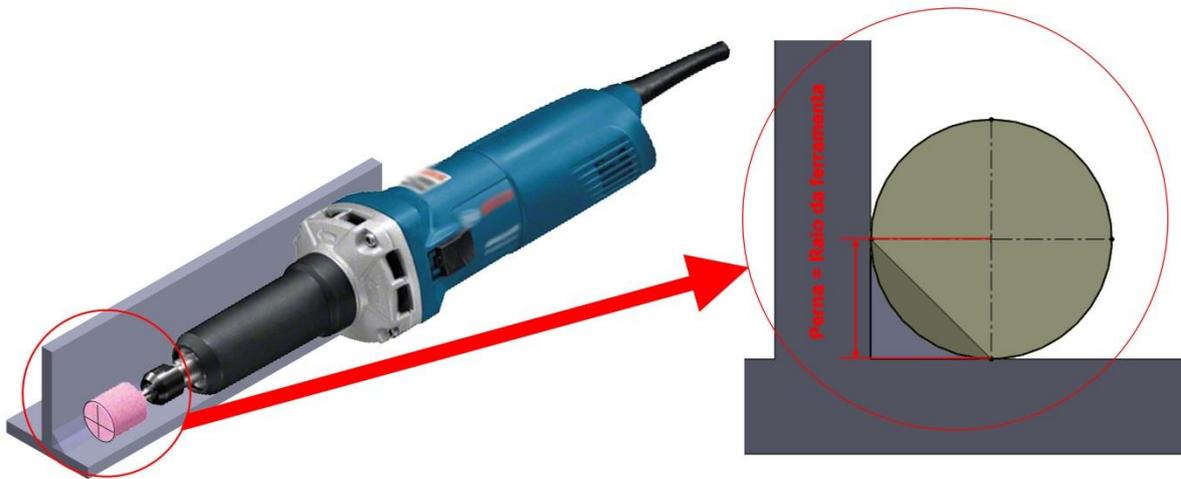
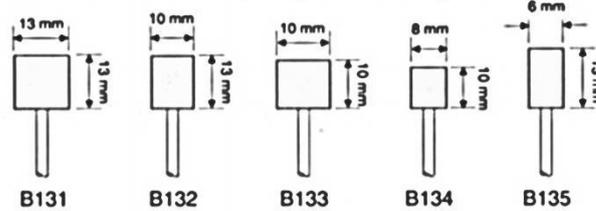


Figura 2.35 - Marcação de limites do filete na prática.

A partir dessa marcação, o soldador inicia a soldagem e decide, durante o processo, se há necessidade ou não de tecimento ou multipasses para se atender o projeto. O desgaste do metal base é superficial, sem haver remoção em demasia de material a ponto de comprometer a adesão ou resistência da solda.

**Pontas Montadas - Tipo B (Hastes de 3,2 mm de diâmetro)**



**Pontas Montadas - Tipo C (Hastes de 6,4 mm de diâmetro)**

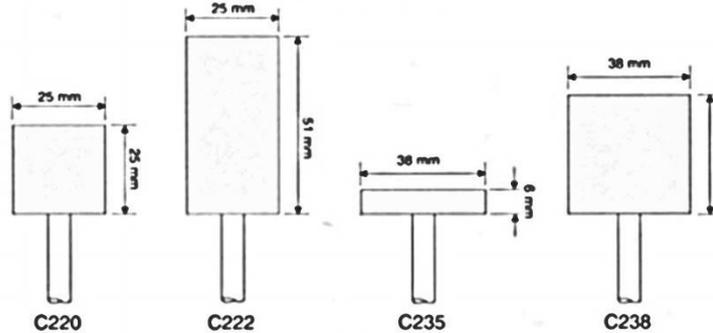


Figura 2.36 - Rebolos e medidas de mercado (NORTON ABRASIVOS, 2013).

No desconhecimento dessa técnica, utiliza-se o uso de oficina, com usinagem do excesso da superfície soldada, até que se tenha um filete dentro dos valores especificados no projeto.

#### 2.1.2.6 - GMAW-S

O modo de transferência metálica por curto-circuito, também referenciado como GMAW-S, é o único exemplo de classificação de mergulho do eletrodo, geralmente entre 0,8 a 1,2 mm, na poça de fusão para GMAW. Tal comportamento ocorre quando a velocidade de alimentação é maior que a taxa de consumo do arame durante parte do tempo. A diferença dos valores provoca o mergulho do eletrodo na poça de fusão e a extinção momentânea do arco elétrico (TAMBOLI, 1999).

Os desdobramentos desse evento incluem a queda súbita da tensão elétrica, seguida da elevação da corrente elétrica de soldagem, ainda durante a imersão do arame. Com o curto-circuito literalmente existente pela ligação metálica do arame entre o polo positivo e negativo da fonte ocorre a transferência metálica por fusão do material de adição por efeito Joule. O metal coalescente se desprende da fração sólida do arame, adere à poça de fusão, movido por forças da tensão superficial da poça líquida e forças magnéticas, e o arco

elétrico se reestabelece. A partir daí, o consumo do arame torna-se novamente mais lento que a alimentação, até um novo curto-circuito, reiniciando o ciclo, como ilustra a Figura 2.37 (AWS WHB, 1984; NORRISH, 1992; TIMINGS, 2008).

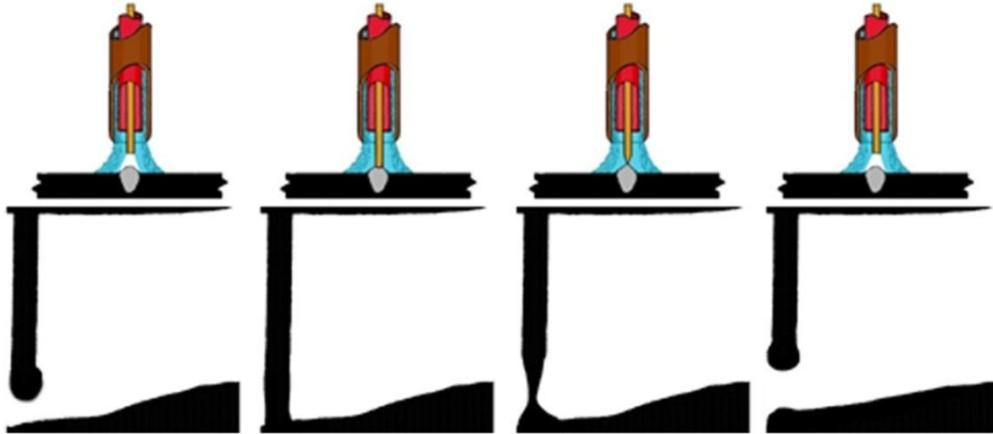


Figura 2.37 - Em GMAW-S ocorre a extinção momentânea do arco elétrico.

Embora se assuma que o processo GMAW-S seja estável, se os parâmetros não forem cuidadosamente escolhidos não há regularidade na ocorrência de curtos-circuitos. Norrish (1992) apresenta (ver Figura 2.38), a distribuição de curtos-circuitos ao longo do processo de soldagem em GMAW, e com os parâmetros certos, é possível obter regularidade com frequência acima de 100 curtos-circuitos por segundo. Tamboli (1999) diz que a frequência de curtos-circuitos está entre 60 e 200 por segundo. Norrish (1992) amplia essa faixa para 20 a 200 eventos por segundo. Nadzam *et al.* (1995) generalizam essa faixa para até 200 eventos por segundo. Curtos-circuitos com duração menor que 1 ms geralmente não produzem transferência metálica (ADOLFSSON *et al.*, 1999).

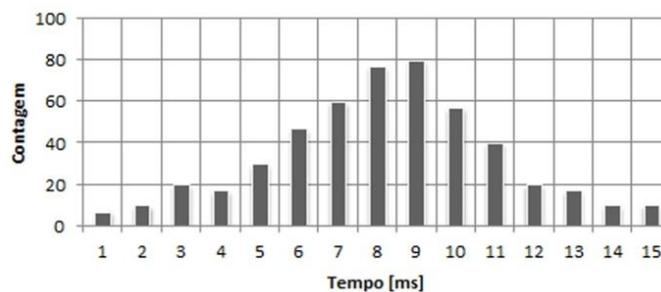


Figura 2.38 - Histograma de tempo entre curtos-circuitos em GMAW-S (modificado de NORRISH, 1992).

A soldagem em GMAW-S possui baixo aporte térmico, principalmente pelo tamanho reduzido da poça de fusão e menor transferência de energia para o metal base devido à frequência de curtos-circuitos. Uma consequência desse comportamento é o rápido resfriamento da poça de fusão, o que permite utilizá-la em chapas de pouca espessura e com total liberdade para os ângulos de trabalho da tocha. Tal configuração, entretanto, não é pré-qualificada pelo AWS D1.1 e exige um nível de cuidado e expertise maior para o projeto de juntas a serem soldadas por esse processo (TAMBOLI, 1999).

A configuração dos parâmetros de soldagem nesse modo de transferência envolve faixa bem limitada de operação para deixar o processo estável e o mais regular possível. A Tabela 2.3 apresenta algumas faixas de valores para soldagem GMAW-S de ferrocarbono. A Figura 2.39 indica os parâmetros para soldagem de ferrocarbono com a utilização do gás de proteção misturado Ar+2%CO<sub>2</sub> e Ar puro. Não há, no entanto, os parâmetros detalhados de tensão e corrente elétrica em GMAW e os variados modos de transferência metálica para cada gás comumente utilizado e suas misturas. Outros ajustes também influenciam o processo para manter a transferência como curto-circuito. Reduzir o *stand off*, deixando-o entre 2 e 3 mm, aumenta a ocorrência de curtos-circuitos, manter os valor de *stick out* entre 10 e 15 vezes o diâmetro do arame, e utilizar valores baixos de diâmetro para o arame (ALTHOUSE *et al.*, 2013).

Tabela 2.3 - Valores aproximados para soldagem de ferrocarbono em curto-circuito (ALTHOUSE *et al.*, 2013).

| Diâmetro do arame [mm] | Tensão de soldagem [V] | Corrente elétrica de soldagem [A] |
|------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| 0,76                   | 15-21                  | 70-130                            |
| 0,89                   | 16-22                  | 80-190                            |
| 1,14                   | 17-22                  | 100-225                           |

A estabilidade do processo GMAW-S permite a produção de soldas uniformes e de boa qualidade global, estreitamente relacionada à frequência de ocorrência de curtos-circuitos. Com uma frequência maior de curtos-circuitos e menor deposição de material por curto há menor presença de defeitos, com menor probabilidade de respingos.

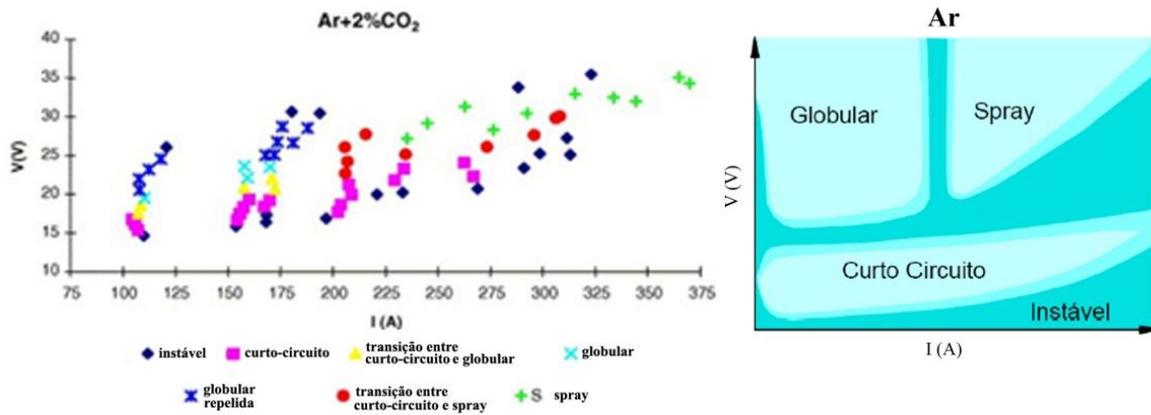


Figura 2.39 - Modos de transferência metálica por gás de proteção, 98% Ar + 2% CO<sub>2</sub> (modificado de PIRES *et al.*, 2012) e 100% Ar (MODENESI, 2008), respectivamente.

A intermitência de abertura e extinção do arco elétrico também é utilizada como gatilho em sistemas de sensoriamento e monitoramento da poça de fusão (KOIKE *et al.*, 1999; FRANCO, 2007).

A literatura sobre esse processo de soldagem é vasta. Na busca de se encontrar resultados mais econômicos e de melhor desempenho, muitos trabalhos são desenvolvidos comparando processos de soldagem ao GMAW, especificando combinações de gás, tipos de metais e ligas soldadas, modelagens de transferência de calor e massa, técnicas aplicadas de controle e inspeção, ou até na busca de maiores esclarecimentos sobre o arco elétrico do processo. Há estreitamento na literatura, no entanto, quanto maior a especificidade da aplicação do processo de soldagem. Poucos trabalhos abordam projetos e desempenho de GMAW em juntas. A predominância dos ensaios e experimentos na literatura é feita em chapa plana ou juntas de topo, enquanto que uma grande frente de trabalho vem investigando aplicação de GMAW em tubulações.

Para juntas tipo T, A. Unt *et al.* (2013) avaliam a influência da utilização de soldagem a arco laser autógeno e HLAW em aço de baixa liga (menos de 5% de elementos de liga) na geometria do filete, principalmente sobre a amplitude da penetração e largura do cordão em metal base de diferentes espessuras e encontraram soldas de boa qualidade visual, apesar da penetração parcial.

Madeira *et al.* (2010) elucidam os resultados de testes mecânicos realizados para aprovação de juntas de topo soldadas, seja GTAW ou GMAW, em aço inoxidável ferrítico de espessura até 2 mm. Embora os resultados sejam direcionados ao ensaio Erichsen, é válido ressaltar para esse trabalho que GMAW tende a formar cordões de solda com uma geometria mais variável que GTAW e essas variações dificultam a caracterização da junta pelo ensaio. Também, os ensaios de tração não detectaram diferenças relevantes para soldas feitas em GMAW e GTAW.

Muitos modelos de geometria do cordão de solda situam-se no universo da junta de topo e junta sobreposta, utilizando-se de diferentes processos soldagem e distinta composição do metal base, como Balasubramanian *et al.* (2010). Coraini *et al.* (2011) abordam principalmente as distorções e influências de chanfro de 60° em junta de topo em soldagem de liga de alumínio AA 5052 H34 com processo GMAW-P.

Machado (2011) compara os resultados de aplicação de diferentes normas e códigos (AISC, EUROCODE 3, AWS, IIW) no resultado de juntas soldadas de filete, em junta tipo T e sobreposta, pouco abordado na literatura e de amplo emprego em estruturas, como as amparadas pelo AWS D1.1 Código para Soldagem Estrutural Aço.

Um trabalho que segue o mesmo nicho desta investigação é de Tham *et al.* (2012), no qual relacionam os parâmetros de soldagem e a geometria do cordão de solda em filete, com GMAW na posição 3F descendente.

## **2.2 - PROBABILIDADE CONDICIONAL**

Quando um evento possui a probabilidade de influenciar outro, é possível utilizar o conceito de probabilidade condicional para calcular essa relação. Dado um evento A e um evento B, tem-se em  $P[A|B]$  a probabilidade condicional de A dado que o evento B ocorreu, dado que a probabilidade de B seja maior que zero ( $P[B] > 0$ ) (LEON-GARCIA, 1994).

Imagine que a probabilidade do evento B seja calculada pela frequência relativa de sua ocorrência em uma série de experimentos. Tem-se então que  $P[A|B]$  é a frequência de se ter A quando B ocorrer, ou seja, a frequência de  $A \cap B$  (ver Figura 2.40).

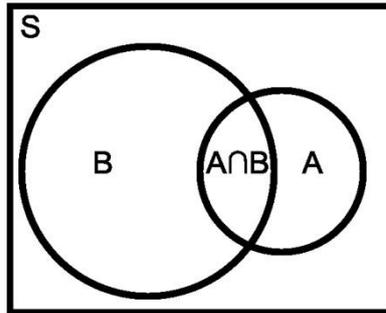


Figura 2.40 - Relação  $P[A|B]$  na intersecção entre conjuntos.

### 2.3 - FILOSOFIA DE BAYES

Dado um conjunto de variáveis em um processo, uma rede bayesiana contextualiza as relações probabilísticas entre suas variáveis de interesse, como dependência e/ou relações causais, através de um grafo acíclico direcionado (em inglês *directed acyclic graph*, DAG) composto por nós, ou variáveis aleatórias, interconectados ou não (JENSEN, 1996), ver Figura 2.41. As relações de probabilidade entre os nós contribuem com o tratamento de dados de entrada em redes neurais e torna-se uma alternativa adicional ao uso de técnicas de regressão, classificação, e/ou agrupamento de dados.

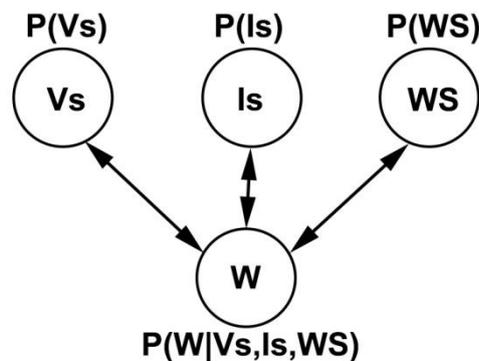


Figura 2.41 - Exemplo simplificado de uma rede bayesiana (modificado de HECKERMAN, 1995).

Basicamente, uma rede Bayesiana foca na descoberta da distribuição de probabilidade posterior de um grupo de variáveis aleatórias, com um dado arranjo da rede e observações. Essas observações alteram a distribuição de probabilidade de nós subsequentes a partir de uma distribuição de probabilidade a priori, ou seja, a influência de probabilidades conhecidas em outra que se quer conhecer, como apresenta a Regra de Bayes (ver Equação

2.17). Sejam  $B_1, B_2, \dots, B_n$  partes mutuamente exclusivas do espaço amostral  $S$ , denominadas  $B_j$ , ver Figura 2.42.

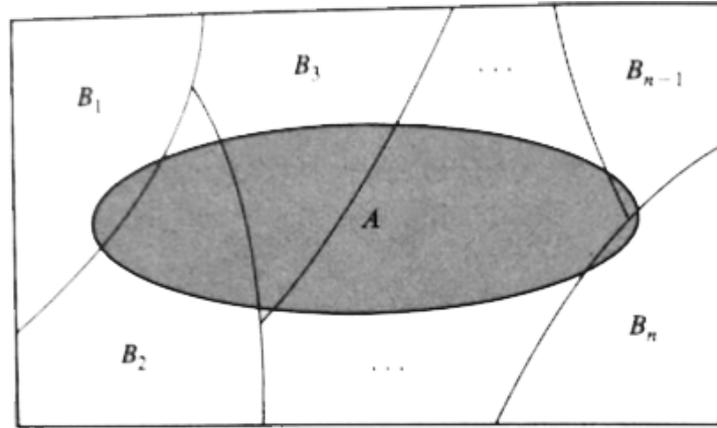


Figura 2.42 - Espaço amostral  $S$  dividido em partes mutuamente exclusivas (LEON-GARCIA, 1994).

A partir do conhecimento do Teorema da Probabilidade Total (Equação 2.9), caso o evento  $A$  venha a acontecer, discrimina-se a probabilidade de  $B_j$  acontecer pela Equação 2.10, ou Regra de Bayes.

$$P[A] = P[A|B_1]P[B_1] + P[A|B_2]P[B_2] + \dots + P[A|B_n]P[B_n] \quad (2.6)$$

$$P[B_j|A] = \frac{P[A \cap B_j]}{P[A]} = \frac{P[A|B_j]P[B_j]}{\sum_{k=1}^n P[A|B_k]P[B_k]} \quad (2.17)$$

Em outra notação para Regra de Bayes, utiliza-se  $X$  como variável aleatória,  $x$  como o valor assumido pela variável aleatória,  $\mathbf{X}$  como um vetor de variáveis aleatórias e  $\mathbf{x}$  como os valores assumidos correspondentes àquele vetor. Dessa forma, dado que  $p(X = x|\xi)$  ou  $p(x|\xi)$  signifique a probabilidade de  $x$  ocorrer dado o conhecimento a priori de  $\xi$ , e  $D = \{X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n\}$  como um vetor de observações (HECKERMAN, 1995), tem-se que:

$$p(x_{n+1}|D, \xi) = \frac{p(x_{n+1}|\xi) \cdot p(D|x_{n+1}, \xi)}{p(D|\xi)} \quad (2.18)$$

Onde,

$$p(D|\xi) = \int p(x_{n+1}|\xi) \cdot p(D|x_{n+1}, \xi) dx_{n+1} \quad (2.19)$$

O operando  $p(x_{n+1}|D, \xi)$  simboliza o conhecimento a posteriori do processo, o operando  $p(x_{n+1}|\xi)$  simboliza o conhecimento a priori do processo, e o operando  $p(D|x_{n+1}, \xi)$  é o comportamento da variável aleatória das observações.

É limitado o uso de redes bayesianas aplicados em soldagem, expandindo mais para o uso de redes neurais bayesianas, que são amplamente utilizadas em áreas biológicas, para modelagem e inferência na predição entre causas e efeitos, diagnóstico entre efeitos e causas, inferências entre causas e efeito comum, e qualquer combinação das anteriores. Ye *et al.* (1998, 1999) fazem uso de redes neurais bayesianas-gaussianas para contornar as limitações impostas por redes neurais em processos industriais, principalmente quanto à restrição de continuidade no aprendizado encontrada na BPNN, entre outras. Há esclarecimento do comportamento da *Bayesian-Gaussian Neural Net* (BGNN), estatístico e de treinamento, em sistemas não lineares *Single Input Single Output* (SISO).

Alguns softwares no mercado utilizam modelos empíricos de processos de soldagem para predição do resultado da junta projetada, fazendo uso de interfaces gráficas e arranjos de juntas em 3D, como o VRTEX® da Lincoln Electric, RobotStudio® e VirtualArc® da ABB. O software VirtualArc® da ABB trabalha com a predição do perfil da solda, qualidade e defeitos através do uso de redes neurais bayesianas aplicada a uma extensa base de dados.

## **2.4 - ESPECIALISTA, INFERÊNCIA, MÃO DE OBRA E RISCOS**

A aplicação da estatística tem o intuito de inferir sobre o processo de soldagem através dos dados experimentais (ALFARO *et al.*, 2006), extraindo um conhecimento especialista de comportamento e correlações da soldagem, como um profissional da área.

Chawla (1992) e Melton (1992) sugerem que qualquer soldador consegue inferir sobre estabilidade e qualidade dos processos de soldagem através da visão e audição. A complexidade dos processos de soldagem envolve um conhecimento extenso de tipo de solda, materiais, superfície, monitoramento, fontes, acessibilidade à superfície soldada, tratamento térmico pré e pós-solda, bem como os equipamentos e parâmetros de soldagem, como tensão, corrente, eletrodo, proteções, inclinação da tocha, tipo de bocal, *stand off*, velocidades de alimentação e soldagem, temperaturas, aporte térmico, presença de defeitos

e seus motivos, entre outros e suas correlações. Tanto conhecimento envolvido no processo exige um trabalhador especialista, cuja carência no mercado, em qualificação, oportunidades, tempo de formação e aposentadoria precoce, torna-o oneroso.

Mesmo que o soldador consiga elencar todas as variáveis de um processo de soldagem, seu trabalho ainda é limitado pela repetitividade, garantia de qualidade e exposição aos riscos associados aos ambientes insalubres como é característico da soldagem. Goldman, (2002) e Antunes Silva (2003) mostram uma análise ergonômica do trabalho do soldador, e listam acidentes envolvidos e riscos à saúde associados aos diversos tipos de processos de soldagem. Problemas respiratórios (COLACIOPPO 1985; THORNTON 1994; CHUNG *et al.* 1997), de visão (MARINE, 1994), ruído, carga de trabalho, estresse e postura (TORNER *et al.*, 1991) minam o trabalhador de solda com um ambiente de trabalho de alto risco. O processo de soldagem GMAW, por exemplo, possui elevada emissão de raios ultravioletas, devido à baixa produção de fumos que servem como barreira para a radiação, além de produzir ozônio.

O próprio manuseio do equipamento, como a fonte de soldagem pela regulagem de tensão e o uso dos eletrodos, pode ser prejudicial ao trabalhador pelo risco elétrico presente nos processos (MELTON *et al.*, 2005). Redirecionar o soldador para tarefas de gerenciamento, em vez de expô-lo às condições extenuantes de soldagem encontradas na literatura, reforça o o uso da automação dos processos de soldagem (EBLE, 1995).

A limitação de mão de obra qualificada, os cuidados mais maduros em saúde, segurança e meio ambiente implicam na ampliação da automação nos processos de soldagem, em destaque ao uso do GMAW pelas características singulares que tem e elevado número de variáveis que podem ser controladas e/ou monitoradas.

#### **2.4.1 - Modelos: simples ou complexos?**

Os modelos que descrevem os processos de soldagem são de alta complexidade e exigem elevado custo computacional para o processamento das não linearidades e aleatoriedades decorrente das características do processo de soldagem (PINTO, 2011). Descrever a dinâmica do processo através das interações ocorridas na soldagem, com maior precisão numérica, é tipicamente abordado por modelo físico com validação estatística, modelo por

redes neurais com validação empírica e/ou modelo por regressão linear múltipla com validação empírica. A literatura, no entanto, acusa que os casos tornam-se válidos dentro de faixas de operações restritas, seja por suposições de forças interativas, linearização, considerações de constantes empíricas e/ou geometria específica da poça de fusão.

Para GMAW, uma série de inconsistências para elaboração de modelo do processo aponta para comportamento próximo da constância, como o baixo aporte térmico, a definição de parâmetros diretos para soldagem e maior estabilidade do arco elétrico, entre outros. Com a automação do processo, outras variáveis tornam-se mais interessantes para análise e incorporação em modelo. No entanto, mesmo com o melhor contexto para elaboração de leis físicas que descrevem a dinâmica do processo, parâmetros como tensão superficial da poça de fusão, densidade da coalescência do metal de adição ao metal base, e outras variáveis, não são tangíveis. Tais grandezas exigem medição pontual durante o processo de soldagem e são extremamente significantes para a elaboração de um modelo. Para processos de soldagem, no entanto, a literatura é ramificada de acordo com as variáveis de interesse consideradas na ponderação do modelo, número de experimentos realizados e sintonia, geralmente desconsiderando a gama de parâmetros, sejam diretos ou indiretos, que influenciam a geometria do cordão de solda (PINTO, 2011).

Dessa forma, com o tratamento a priori e a posteriori dos dados pela Regra de Bayes, busca-se relacionar número de entradas àquelas significantes para o problema, e conseqüentemente reduzir o empirismo típico de soldadores para encontrar parâmetros de soldagem que atendem aos critérios de projetos de junta.

Os passos para a análise bayesiana são: (1) identificar o conhecimento a priori do universo investigado; (2) organizar as observações do universo investigado em variáveis mutualmente excludentes ou correlações. A partir daí, utiliza-se a distribuição *a priori* do problema, coletam-se os dados, calcula-se a distribuição *a posteriori* dos dados coletados e então fazem-se predições (modificado de NEAL, 1995), ou seja, qual é a distribuição do parâmetro geométrico de saída dado os parâmetros de entrada no caso desse trabalho.

## **2.5 - MEDIÇÃO DA LARGURA DO CORDÃO DE SOLDA**

São dois momentos para se retirar informações de dimensões de um cordão de solda. O primeiro deles seria à medida que o cordão é formado, ou seja, com o fim do regime da

poça de fusão para formar o cordão, faz-se a medição, bem próximo ao tempo real de formação do cordão de solda. O segundo seria em um momento qualquer posterior à solda.

O paquímetro ou micrômetro ou outros instrumentos mecânicos de medição podem ser utilizados para estimar o valor da largura do cordão de solda já solidificado. No entanto, seu uso implica em deformação do mensurando, necessidade de alta repetitividade para retirar uma grande amostra de um cordão, além de variados agregadores de incertezas providas do uso do elemento mecânico. Um instrumento mecânico mais adequado para a medição de filete é o calibre, ou gabarito, de solda (ver Figura 2.43). Seu formato permite a medição de tamanho de perna, garganta teórica e convexidade do filete.

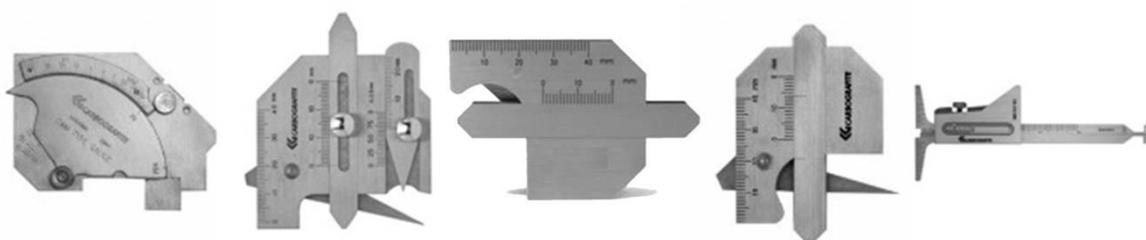


Figura 2.43 – Exemplos de calibre de solda.

Em processos que monitoram fenômenos que ocorrem em frações de segundo, como a extinção do arco elétrico em GMAW-S, é necessária a utilização de câmeras de alta velocidade para monitoramento em tempo real. É dita câmera de alta velocidade o instrumento que captura imagens operando em faixas superiores a 1000 frames por segundo. Em GMAW-S, por exemplo, a ocorrência de curtos-circuitos em GMAW-S exige taxa de amostragem capaz de capturar de 20 a 200 curtos-circuitos por segundo. Assim, de acordo com a taxa de Nyquist que acusa uma taxa de captura com o dobro da taxa de cadência do evento, a configuração de uma câmera precisaria, no mínimo, capturar mais que 400 frames por segundo. Algoritmos de medição da largura da poça de fusão calculam a relação entre a imagem real e virtual da poça de fusão (KOIKE *et al.*, 1999; FRANCO, 2007).

A partir da formação do arco elétrico e transferência metálica, há excitação da poça de fusão pela tensão e corrente elétrica, além de outras forças, como gravitacional, pressão do arco elétrico e tensão superficial, que compõem a vizinhança da fusão *per si*. Entre as

diversas consequências dessa excitação, tem-se na oscilação da poça de fusão uma variação geométrica das dimensões a serem medidas por visão computacional. Para este trabalho, no entanto, câmeras e visão computacional não são abordadas para o monitoramento contínuo do processo de soldagem.

Em GMAW-S, por exemplo, mesmo com alta taxa de resfriamento da poça de fusão, baixo aporte térmico do processo de soldagem e elevada taxa de ocorrência de curtos-circuitos, há oscilação da geometria instantânea local da poça de fusão, e por consequência, erro associado à medição das dimensões da imagem que realimenta a malha de controle. Há também erro de calibração da câmera e relação entre pixel e milímetro, de acordo com a distância focal, excentricidade da lente e brilho. Tais perturbações, que não compõem o escopo desse trabalho, são tratadas como incerteza, ou seja, intervalo que abrange o valor medido, mesmo que haja dúvida sobre ele.

Com o cordão já solidificado, um escâner torna-se uma boa opção de medição. As peças que formam a junta podem ser posicionadas em um suporte, cujo escâner realiza a triangularização do feixe laser e da câmera. O resultado é o valor de pixels do mensurando em uma taxa de medição equivalente a velocidade da câmera, usualmente 30 fps. Apesar de não ser um instrumento que interage mecanicamente com o mensurando, a calibração da triangularização deve ser verificada com frequência. A calibração é feita com a utilização de um mensurando padrão, com dimensões previamente conhecidas, seguido do posicionamento adequado do escâner e cálculo da relação medida real-virtual. Trucco *et al.* (1998) afirmam que a relação de pixels entre o que é capturado no Dispositivo de Carga Acoplada (em inglês *Charged Coupled Device*, CCD) difere do armazenado no *buffer* de memória, cuja relação obedece a Equação (2.20). No entanto, a própria relação de excentricidade entre as dimensões do foto sensor, e da matriz gerada pelo *buffer* pode deformar a relação de medição entre real e virtual.

$$z_{im} = \frac{n}{N} z_{CCD} \quad (2.20)$$

Sendo  $n$  a dimensão no fotossensor e  $N$  a dimensão na imagem carregada do *buffer* até o computador, válido para  $z$  na direção horizontal ou vertical.

A utilização do escâner é adequada para medição de junta de topo, porém para junta tipo T há reflexão da linha do laser e necessidade de um processamento de imagem particular para cada tipo de angulação da junta. Isso implica que o algoritmo de processamento de imagem consiga envolver a medição do cordão com as contribuições das deformações da junta, diferenciação entre tamanhos das pernas do filete, convexidade e concavidade de filete, entre outras variáveis, o que implica em alto custo computacional.

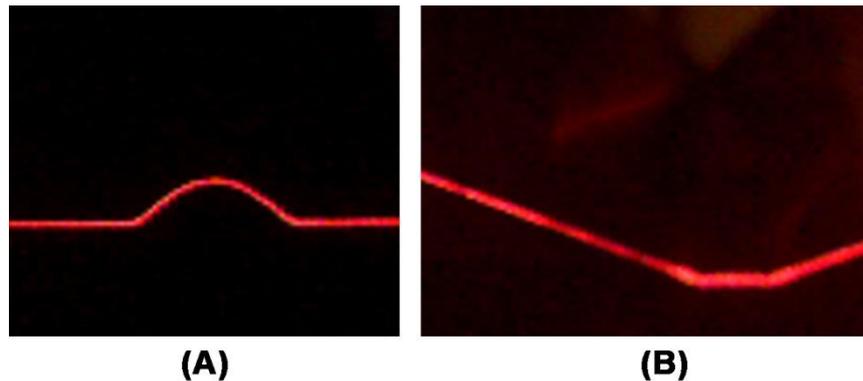


Figura 2.44 - Diferença entre perfil do laser para (A) junta de topo e (B) junta T.

A literatura é convergente sobre as perturbações e ruídos que minam o monitoramento da poça de fusão e do cordão de solda no processo de soldagem. O excesso de radiação emitida pelo arco elétrico, a oscilação e o escorrimento da poça de fusão devido à taxa de resfriamento são alguns exemplos de influência negativa. Em soldagem por arco elétrico, como GMAW, a iluminação da coluna ionizada intensifica a radiação emitida pela própria poça de fusão. De forma global, há saturação das imagens capturadas (KOIKE *et al.*, 1999; FRANCO, 2007; ESDRAS 2011).

Câmeras CCD ou Semicondutor de Óxido Metálico Complementar (em inglês *Complementary Metal-oxide Semiconductor*, CMOS) são denominações para diferentes tecnologias de captação, envio de sinal e processamento de imagens dos fotossensores. Ambas geram sinais elétricos em resposta à excitação luminosa dos fotossensores emparelhados em forma de matriz. A principal diferença é como e quando o sinal elétrico gerado pelo sensor é convertido em sinal digital. Na CCD, cada sensor transfere analogicamente o sinal capturado em sinal elétrico, que é amplificado e convertido para sinal digital de uma só vez na central de processamento da câmera. Na CMOS, entretanto,

há conversão do sinal elétrico para digital no transistor ao fundo do sensor, enviando sinal já digital para a central de processamento de câmera. Em geral, tais particularidades refletem na qualidade da imagem processada e no consumo de energia da câmera (TELEDYNE DALSA, 2012).

Utilizar uma câmera como instrumento para monitoramento e medição de dimensões através das imagens exige o conhecimento dos parâmetros extrínsecos e intrínsecos do universo monitorado. Os parâmetros extrínsecos dizem respeito a leitura dos dimensionamentos da cena real, preferencialmente conhecida. Os intrínsecos são as correspondências entre pixels e parâmetros reais, referenciados na cena virtual capturada pela câmera.

Outra forma de medição pós solda envolve o instrumento Projetor de Perfil, ver Figura 2.45. Através de iluminação ativa, base de posicionamento cartesiano X, Y e de profundidade Z, e lente de aumento, o projetor de perfil permite o cálculo de diversas dimensões nos pontos visualizados na secção de um objeto.

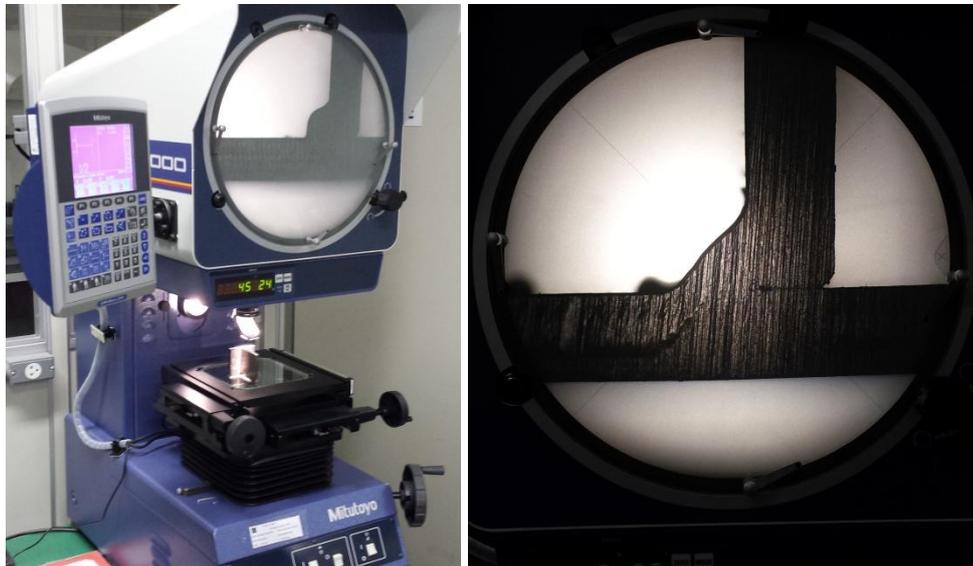


Figura 2.45 - Projetor de Perfil, Laboratório de Metrologia ENM-UnB.

Com o perfil focado, utilizam-se funções de cálculo de distância entre pontos do objeto projetado para estimar as dimensões de perna e largura do filete, e distorção da junta T, ver Figura 2.46.

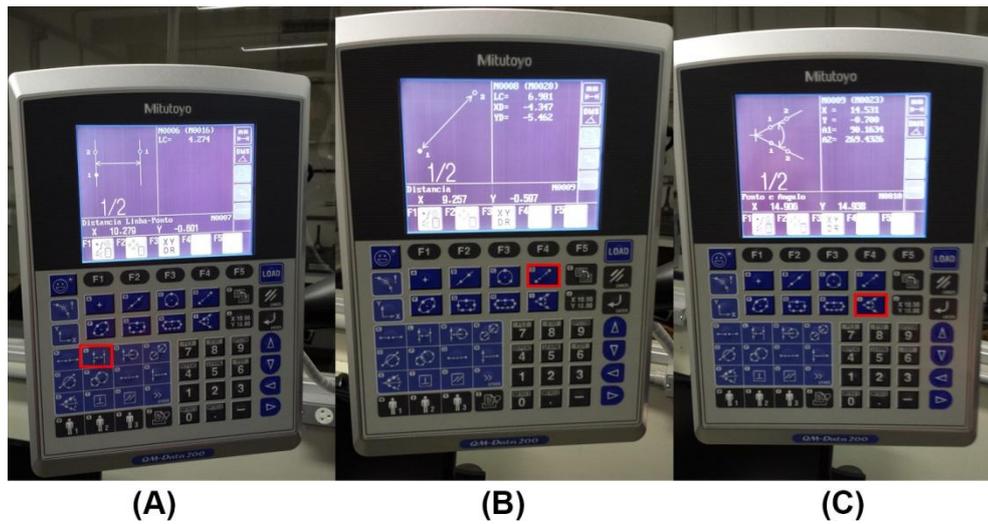


Figura 2.46 - Funções para estimar (A) perna, (B) largura e (C) distorção no filete e junta.

Esse instrumento é de utilização simples e direta, com resolução de 0,001 mm, e é usado nesse trabalho.

### **3 - METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

#### **3.1 - PLANEJAMENTO**

Quatro tópicos compõem o macroplanejamento experimental. Os detalhes da metodologia de cada um são abordados posteriormente, seguido da exposição dos dados empíricos obtidos.

- a. Preparam-se as juntas de ângulo em 90°;
- b. Programa-se o robô para efetuar o traçado da solda;
- c. Efetuam-se testes para se encontrarem os parâmetros de soldagem para o universo investigado;
- d. Configura-se o processo de soldagem escolhido e monitoramento;
- e. Associam-se os parâmetros escolhidos de entrada do processo de soldagem ao parâmetro de saída desejado, de acordo com o planejamento fatorial;
- f. Aplica-se a regra de Bayes, dado o conjunto de conhecimento *a priori* do universo investigado;
- g. Apresentam-se os resultados obtidos, ou seja, o conhecimento *a posteriori* calculado pela Regra de Bayes.

#### **3.2 - METODOLOGIA**

##### **3.2.1 - Projeto de junta**

O universo investigado envolve o projeto de junta de ângulo em 90°, denominada junta tipo T, seguindo critérios AWS D1.1 Código de Soldagem Estrutural - Aço, versão de 2006, com passe único de filete. Segundo Tamboli (1999), filetes de 3/16, 1/4 e 5/16 pol. podem ser realizados com passe único. Filetes de 3/8 pol. em diante precisam de passes adicionais, entre 3 a 8. De acordo com AWS D1.1 (2006), para filetes de 3/16, 1/4 e 5/16 pol. tem-se espessura máxima do metal base de 1/2, 3/4 e acima de 3/4, respectivamente.

O metal base e a alma da junta são compostos de aço SAE/AISI 1020, cuja composição é apresentada na Tabela 3.1. São separadas peças de 200 mm x 50 mm, a partir de uma barra

chata comercial de 5000 mm x 50 mm x 6,35 mm (aproximadamente ¼ pol.) cortada por serra elétrica. Apesar de se ter acesso à guilhotina mecânica, optou-se pela ferramenta citada para evitar o empenamento dos corpos de prova, principalmente nas extremidades cisalhadas. A escolha da espessura do material está em acordo com a AISC J2-2 que apresenta valores de espessura mínima de material soldado para filetes, no intuito de evitar defeitos na solda, como trincas. A literatura também ratifica o uso de chapas de espessura mínima da alma e do metal base de ¼ pol. e um filete, para juntas T, de no mínimo 1/8 pol. (aproximadamente 3,175 mm) (AWS D1.1, 2006; TAMBOLI, 1999).

Tabela 3.1 - Composição Aço SAE/AISI.

| <b>Aço<br/>SAE/AISI</b> | <b>C%<br/>(Carbono)</b> | <b>Mn%<br/>(Manganês)</b> | <b>P.Máx%<br/>(Fósforo)</b> | <b>S.Máx%<br/>(Enxofre)</b> |
|-------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <b>1010</b>             | 0,08 - 0,13             | 0,30 - 0,60               | 0,040                       | 0,050                       |
| <b>1020</b>             | 0,18 - 0,23             | 0,30 - 0,60               | 0,040                       | 0,050                       |

Devido ao óleo e grafite utilizados no armazenamento das barras chatas de aço, as peças são limpas com álcool etílico 92,8° INPM, retiradas rebarbas com escova de aço circular, lixadas e separadas em dois grupos, metal base e alma, como ilustra a Figura 3.1.



Figura 3.1 - Grupos de peças para soldagem.

Aquelas que compõem o grupo alma da junta têm as faces laterais mantidas conforme laminadas, sem desbaste, no plano da espessura da chapa, sem necessidade de alinhá-las na plaina. Dessa forma, pretende-se reduzir as irregularidades com uso da lixadeira no

desbaste lateral da peça, para não afetar o posicionamento em T da alma em relação ao metal base. Posteriormente, utiliza-se um esquadro com angulação de 90° para conferência da relação metal base - alma.

Como a junta sofre influência do aquecimento localizado pelo processo de soldagem, o que implica em distorção (TAMBOLI, 1999), é utilizado o ponteamto de solda por eletrodo revestido nas extremidades opostas do filete. O ponteamto previne o movimento das partes soldadas, não atrapalha o passe de um filete na face oposta, e evita a necessidade de sargentos de posicionamento ou outras técnicas para garantir a perpendicularidade das faces durante a soldagem. Dessa forma, pretende-se mitigar a distorção angular da alma contra o metal base.

Não há consenso da melhor prática utilizada para controlar a distorção. No entanto, princípios de projetos influenciam essa variável (KOU, 2002):

- a. Calcular o cordão para a quantidade mínima de material depositado e número de passes, evitando concavidade ou convexidade acentuada, ou assimetria;
- b. Se possível e viável, utilizar cordão de solda intermitente;
- c. Se possível e viável, soldar próximo ao eixo neutro da junta;
- d. Se possível e viável, utilizar chanfro em V duplo ao invés de V simples, e utilizar a soldagem balanceada ou soldagem ao mesmo tempo nas duas frentes de trabalho;
- e. Eliminar o uso de solda sempre que possível e viável, optando por seções extrudadas ou laminadas.

Segundo Coraini *et al.* (2011), o sentido de laminação da chapa de alumínio não teve significância estatística na deformação angular com GMAW-P, e que juntas chanfradas de 60° apresentaram maiores distorções angulares que juntas sem chanfro. Estas, no entanto, apresentaram distorção rotacional. Fraga (2009) afirma que a direção da soldagem em relação ao sentido de laminação da chapa de alumínio magnésio é uma variável de significância estatística. Neste trabalho, o cordão de solda é traçado no sentido de laminação da chapa chata comercial.

Foi feito o ponteamto das juntas fundamentalmente para facilitar o posicionamento da alma e reduzir a distorção angular. Utilizou-se um esquadro de campo de 90°, processo de

soldagem em eletrodo revestido E6013 em três pontos (extremidades e no meio da junta). O metal base foi apoiado em uma superfície plana de aço 1020, e a alma no eixo neutro do metal base. A cada ponteamento, fez-se a conferência da angulação da junta com o esquadro (ver Figura 3.2). Na presença de distorção, uma força era aplicada na face oposta à deformação, através do martelo de unha. Então, uma nova conferência era feita.

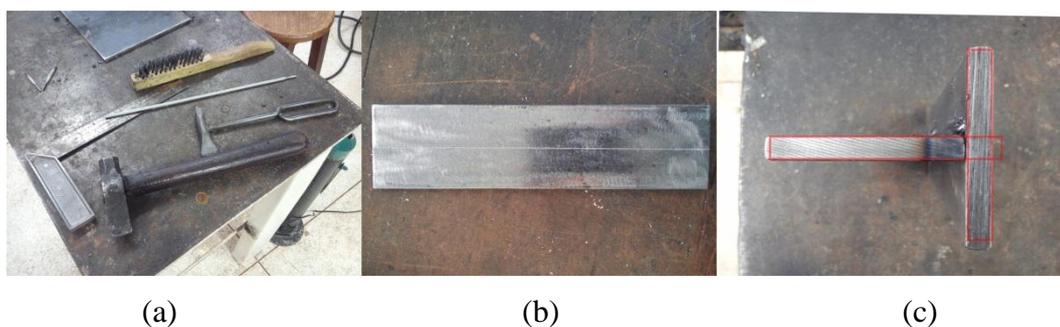


Figura 3.2 - Em (a) ferramentas, (b) marcação longitudinal na linha neutra do metal base e (c) ponteamento da junta.

Conforme mostra a Figura 3.3, algumas das peças possuem leve distorção angular visualmente, não detectada pelo posicionamento do esquadro.

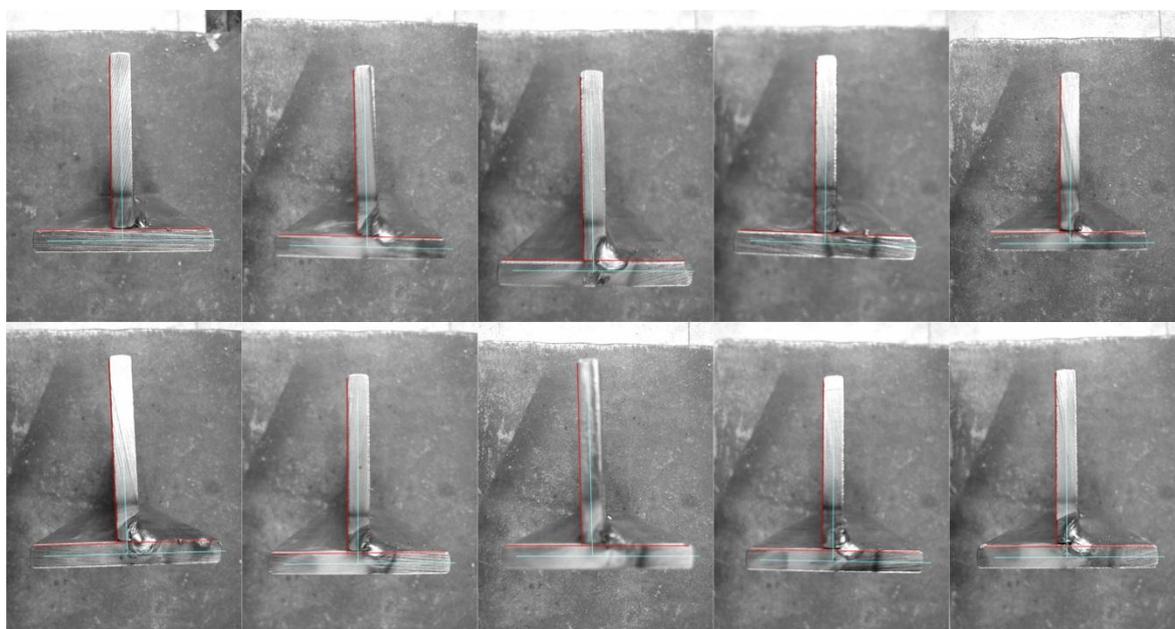


Figura 3.3 - Amostra de dez peças preparadas para soldagem em filete. Na vizinhança de operação de um filete máximo para a chapa de ¼ pol., no entanto, considera-se que não há distorção na junta para as 16 peças preparadas.

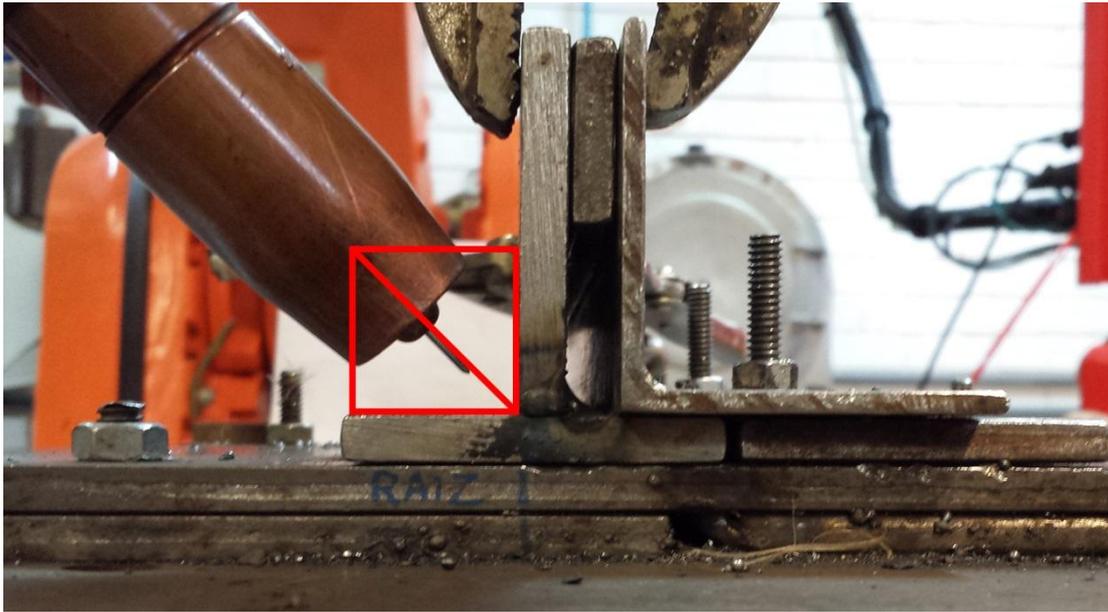


Figura 3.4 - Posição da tocha para soldagem de junta tipo T, de acordo com Figura 2.14.

Para o posicionamento adequado da tocha que permita repetibilidade das tarefas do IRB 2000 e bom contato com o polo negativo com a junta a ser soldada, foi confeccionada uma base metálica parafusada à mesa (ver Figura 3.4 e Figura 3.5), demarcação da linha guia da raiz da junta tipo T, com alça em formato não interferente com o ponteamto oposto ao traçado da cordão e presa por dois alicates de pressão.



Figura 3.5 - Base para suporte da junta tipo T a ser soldada.

### 3.2.2 - IRB 2000

O robô industrial IRB 2000 da ABB é utilizado para a realização do traçado da solda na junta T. Os seis graus de liberdade e o uso de TCP (*Tool Center Point*) adequado, o TCP 1, permitem posicionar adequadamente a tocha para a configuração do ângulo de trabalho em  $45^\circ$ , de natureza transversal ao traçado, e ângulo de deslocamento negativo de soldagem em  $-15^\circ$ , de natureza longitudinal ao traçado. Com esse posicionamento, pretende-se aquecer as duas peças que compõem e junta tipo T de forma equivalente, e reduzir a influência o sopro magnético de compressão da massa magnética no processo.

O sopro magnético é um fenômeno que distorce o arco elétrico, devido à sua proximidade a um corpo metálico. Na junta tipo T, as linhas magnéticas em torno da alma podem alterar o posicionamento da coluna elétrica necessária ao processo.

A programação do robô é feita em ARLA (*ASEA Programming Robot Language*) através do software SPORT S3 (*Simplified Programming of Robots*) que facilita a visualização, compilação e construção do programa a ser enviado ao robô. O software permite também que as coordenadas retangulares e *quaternion* do robô sejam vistos a cada posicionamento. Uma ferramenta complementar, o SPORT OrientExpress, calcula as coordenadas do robô em graus ou radianos pelos ângulos de Euler, X para balanceio (em inglês *roll*,  $\phi$ ), Y para empinamento (em inglês *pitch*,  $\theta$ ) e Z para cabeceio (em inglês *yaw*,  $\psi$ ), de acordo com os *quaternion* e uso de posicionamento na ferramenta ou TCP 1, ver Figura 3.6.

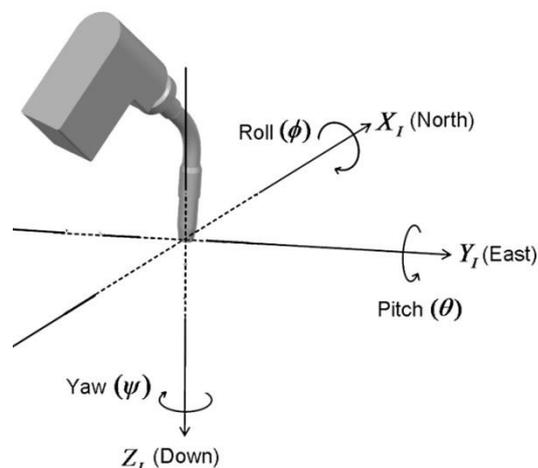


Figura 3.6 - Ângulos de Euler para TCP 1.

O robô trabalha sobre uma bancada com incerteza sobre seu posicionamento em relação às suas coordenadas retangulares. Testes de trajetória e rastreabilidade de trajetória para as velocidades de soldagem desejadas foram feitos. Posicionou-se o robô bem próximo a mesa e marcou-se um ponto A. Variando apenas a coordenada retangular X, em velocidade de 4 mm/s, deslocou-se o robô por aproximadamente 180 mm, o comprimento total do cordão de solda dos experimentos e então marcou-se um ponto B. Com o conhecimento da posição dos dois pontos, traçou-se uma reta como trajetória para deposição do arame durante a soldagem. Essa mesma linha serviu de referência, na coordenada retangular X, para o posicionamento da raiz da junta tipo T.

A partir do conhecimento da trajetória, programou-se que o robô efetuasse o deslocamento do ponto A ao B com velocidades de 4, 6, 8 e 10 mm/s, calculando o comprimento do trajeto e o tempo gasto para descrevê-lo. Detectou-se visualmente que há variação e trepidação de pequenas amplitudes na rastreabilidade de trajetória do robô para velocidades de 10 mm/s ou superior. As velocidades também foram comparadas em valores programados e medidos para o traçado de 180 mm, como mostra a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Avaliação das velocidades de soldagem.

| <b>Velocidades [mm/s]</b>       | <b>4</b> | <b>6</b> | <b>8</b> | <b>10</b> |
|---------------------------------|----------|----------|----------|-----------|
| <b>Tempo médio medido [s]</b>   | 40,4     | 27,1     | 20,3     | 16,3      |
| <b>Tempo médio esperado [s]</b> | 45       | 30       | 22,5     | 18        |

### 3.2.3 - Configuração do processo de soldagem

Como é sabido, a configuração do processo de soldagem envolve um grande número de variáveis e *setups* para que a solda ocorra conforme projetado. Por se tratar de um sistema extremamente não linear, com variáveis acopladas e de alta complexidade, algumas considerações são feitas acerca das faixas de operação do processo. O intuito é delimitar um universo de investigação com a restrição de parâmetros que mais contribuem com a geometria do cordão de solda. Como existem muitas correlações entre as variáveis que governam esse processo, apenas uma parcela delas realmente irá compor as entradas para o cálculo via Regra de Bayes.

Os parâmetros tensão elétrica de soldagem e velocidade de alimentação do arame são definidos na fonte TransPuls Synergic 5000 da Fronius, dentro da faixa delimitada pela

Tabela 3.3. A corrente elétrica de soldagem varia de acordo com o processo. A velocidade de soldagem, o ângulo de trabalho e de ataque da tocha, a CTWD e o *stand off* são configurados no braço robótico ABB. O tipo e a vazão do gás de proteção são fixados. O ciclo de trabalho será menor que 10 min, em temperatura ambiente de 23 °C.

Tabela 3.3 - Informação técnica da fonte.

|  |                    |                                   |                    |
|--|--------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Tensão da rede                         | 3 x 400 V          | Ciclo de trabalho em 10 min/40° C | 100% d.c. at 360 A |
| Tolerância da tensão da rede           | ±15%               | Tensão em vazio                   | 70 V               |
| Frequência da rede                     | 50 / 60 Hz         | Tensão operacional                | 14,2 - 39,0 V      |
| Fusíveis da rede 3 x 400 V             | 35 A               | Tipo de proteção                  | IP 23              |
| Corrente contínua primária (100 %)     | 18 - 29,5 A        | Tipo de resfriamento              | AF                 |
| Potência permanente primária (100% CT) | 13,1 kVA           | Classe de isolamento              | F                  |
| Cos fi                                 | 0,99               | Dimensões largura/base/altura     | 625/290/475 mm     |
| Grau de eficiência                     | 90%                | Massa                             | 35,6 kg            |
| Faixa de corrente para soldagem        | 3 - 500 A          | Marcas de conformidade            | CE/CSA             |
| Ciclo de trabalho em 10 min/40° C      | 40 % d.c. at 500 A | Segurança                         | S                  |

Os parâmetros de entrada do processo definem o tipo de transferência metálica e a geometria do cordão de solda. Mesmo com a ampla faixa de operação da fonte de soldagem, do tipo de arame, do robô manipulador da tocha de soldagem e do modo de transferência em curto circuito, os parâmetros do processo serão como mostra a Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - EPS experimental (NADZAM *et al.*, 1995; PARMAR, 1995; TAMBOLI, 1999; MILLER WELDS, 2012; ALTHOUSE *et al.*, 2013).

| Parâmetro                   | Descrição           | Informação adicional  |
|-----------------------------|---------------------|---|
| Processo de soldagem        | GMAW-S              | Presença de quedas abruptas no valor de $U_s$ e consequentes picos de $I_s$ .   |
| Especificação do eletrodo   | AWS A5.18           | Especificação para eletrodos de aço em GMAW.  |
| Classificação do eletrodo   | ER70S-6             | Composição e aplicação do eletrodo, rico em silício e manganês para soldagem em aço carbono.  |
| Diâmetro do eletrodo        | 1,2 mm              | 1,2 mm (0,047 pol.), tipo <i>DENVER - MIG</i> .<br>Permite corrente de soldagem entre 120 a 380 A.  |
| Características elétricas   | DC+                 | Tensão contínua com eletrodo positivo (DCEP ou DCRP).   |
| Especificação do metal base | SAE/ANSI 1020       | Dimensões: 200 x 50 x 6,35 mm, a partir de chapa chata de aço comercial (comprimento x largura x espessura).                                      |
| Pré-aquecimento             | -                   | Eletrodo e juntas em temperatura ambiente, 23 °C.   |
| Tensão elétrica de soldagem | 17   19   21   23 V | Há tolerância de ±15% da fonte de soldagem.   |
| Velocidade de soldagem      | 5   7   9 mm/s      | Permite velocidades entre 0 e 250 mm/s pela operação do braço robótico ABB IRB 2000. Alfaro <i>et al.</i> (2006) utilizam aproximadamente 8 mm/s. |
| Posição de soldagem         | 2F                  | Junta tipo T, metal base posicionado no plano horizontal  |

|  |                                |   |
|--|--------------------------------|---|
| PWHT                                   | -                              | e alma perpendicular.<br>Não há.  |
| Gás de proteção e vazão                | <i>Stargold</i>                | Mistura de Ar 94% com CO <sub>2</sub> 6%, com vazão a 15 l/min. A válvula manual permite vazão entre 0 e 40 l/min.  |
| Projeto da junta                       | De ângulo, em 90°              |   |
| Corrente elétrica de soldagem          | -                              | Definida pelo processo através da velocidade de alimentação do arame e indutância da fonte.   |
| Velocidade de alimentação do arame     | 5   6   7   8 m/min            | Operação ideal entre 5 e 8 m/min. A composição e diâmetro do arame influenciam na WFS.  |
| Valor de <i>stand off</i>              | 16 mm                          | Para transferência metálica em curto-circuito.  |
| Valor de <i>stick out</i>              | ~6 mm                          | Para transferência metálica em curto-circuito, faixa de 6 a 13 mm.  |
| CTWD                                   | ~15 mm                         | Entre 12 a 20 mm para transferência metálica em curto-circuito.   |
| Ângulo de trabalho<br>Ângulo de ataque | 40°   43°   46°<br>-15°        | A tocha é posicionada com inclinação de -15°, projetando o arco elétrico para aquecer a raiz da junta antes da deposição de metal.  |
| Indutância                             | 2.0                            | A fonte Fronius permite regular a indutância de 0.0 a 10.0, com resolução de 0.1.   |
| Modelo da tocha                        | Robacta                        | Fronius.  |
| Modelo da fonte                        | TransPuls<br>Synergic 5000 CMT | Fronius. A fonte necessita de vazão na válvula do cilindro do gás superior a 20 l/min para realizar o controle de vazão a 15 l/min.   |
| Frequência de aquisição de dados       | 10000 Hz                       | A alta frequência foi utilizada para observar com detalhes a definição do modo de transferência e contribuir com outros trabalhos no laboratório. Alfaro <i>et al.</i> (2006) utilizam 4032 Hz. |

As características do arame utilizado nos experimentos influenciam diretamente a faixa de operação do processo de soldagem. Para o tipo *DENVER - MIG* de 1,2 mm de diâmetro o campo Informações Adicionais (ver Tabela 3.5) apresenta alguns limites de operação para o processo.

Tabela 3.5 - Informação Adicionais do eletrodo *DENVER - MIG* de 1,2 mm.

| Metal dep. [%]   | Propriedades Mecânicas   | Pos. de soldagem EN26947 | Diâmetro do arame [mm] | Limites I <sub>sx</sub> V <sub>s</sub> | Tx. de dep. [kg/h] | Gás de proteção e Polaridade   |
|--|--|--------------------------|------------------------|--|--------------------|--|
| C 0,09<br>Si 0,90<br>Mn 1,60<br>P 0,010<br>S 0,010<br>Cu 0,20<br>Ni 0,005<br>Cr 0,025<br>Mo 0,003<br>V 0,004 | <b>CO<sub>2</sub>CC+</b><br>1. Limite de Resistência (LR):550 MPa<br>2. Limite de Escoamento (LE):> 450 MPa<br>3. Alongamento Total (A):30%<br>4. Charpy V (ChV, entalhe em V): 60 J (-29°C) | Todas                    | 1,2                    | 120 a 380 A<br>18 a 34 V               | 1,5 a 8            | 96% Ar +<br>4% CO <sub>2</sub><br>CC+<br><br>98% Ar +<br>2% CO <sub>2</sub><br>CC+ |

A espessura do metal base determina a corrente elétrica exigida pela fonte. O diâmetro do arame utilizado em laboratório é 1,2 mm, tipo *DENVER - MIG*, e permite uma variação de corrente no processo de 120 a 380 A.

De acordo com Nadzam *et al* (1995), a velocidade de alimentação do arame também está associada ao diâmetro do arame. Para o uso de GMAW entre 200 e 250 A utiliza-se WFS entre 5 m/min a 7,5 m/min. O valor de *stick out* deve estar entre 6 e 13 mm, com ângulo de trabalho, que também influencia a geometria do cordão de solda, reto (90° com o metal base). O gás de proteção é *Stargold*, uma mistura comercial de argônio 94% com CO<sub>2</sub> 6%, com vazão a 15 l/min, especial para soldagem GMAW em aço carbono. A indutância é definida pelo controle da fonte, no parâmetro Dinâmico, que assume valores de 0.0 a 10.0, com resolução de 0.1., mas não fica claro se o valor é em henry ou se há correlação direta entre a função e a indutância real.

O monitoramento do processo é feito sobre três parâmetros:  $U_s$  com uso de voltímetro de condicionamento de sinal,  $I_s$  com uso de amperímetro de efeito Hall, e WS configurado no robô IRB 2000. Um circuito incluindo filtragem e amplificação do sinal comunica com a placa de aquisição de dados PCI Eagle 703s instalado no computador industrial ADVANTECH ICP-622. Um programa em Labview® utiliza um instrumento virtual para apresentar as escalas e plotar os dados adquiridos. O software WaveView for Windows® na opção de osciloscópio (OSC) é utilizado para verificar a presença de ruído nos sinais de entrada da placa, como mostra a Figura 3.7.

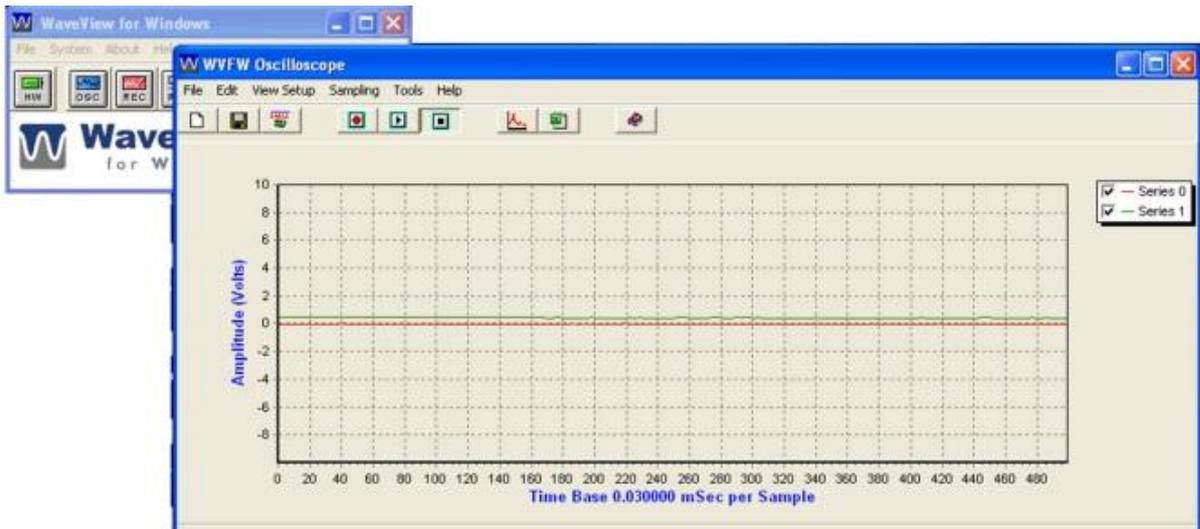


Figura 3.7 - Sinal de tensão e corrente sem ruído no OSC do Waveview for Windows®.

Experimentos iniciais foram feitos para encontrar um modo de transferência que caracterize curto-circuito, como mostra a Figura 3.8.

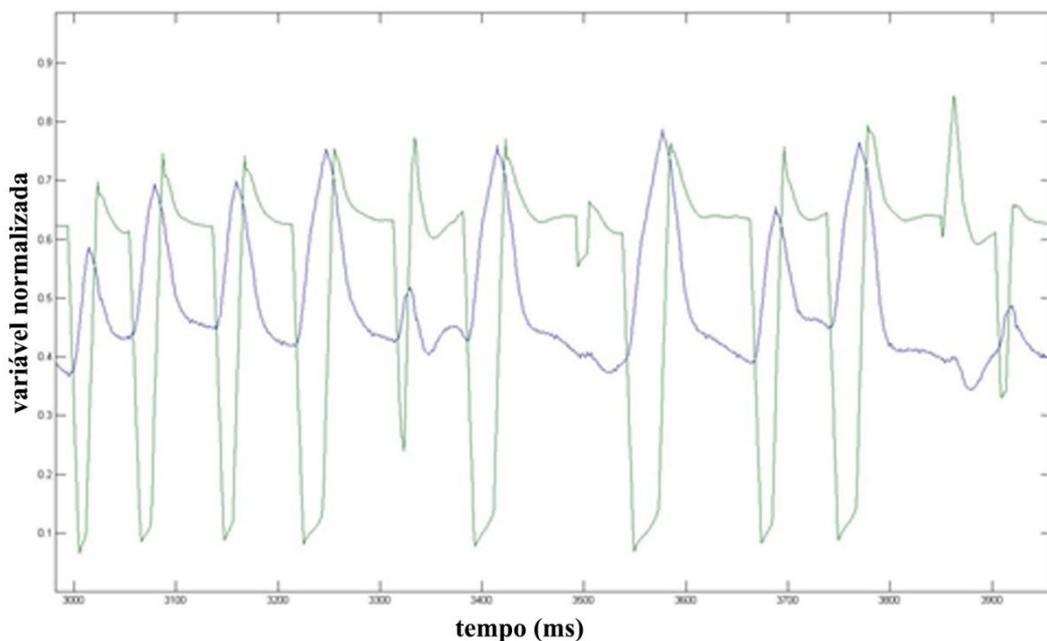


Figura 3.8 - Sinal adquirido de tensão (verde) e corrente (azul) elétrica, normalizados no processo GMAW-S.

Tamboli (1999) relata que o uso de GMAW-S em estruturas metálicas geralmente não é adequado, por apresentar juntas com problemas de fusão do cordão, com o aparecimento de fenômenos *cold lap* ou *cold casting*. No entanto, não é uma aplicação proibida,

principalmente por GMAW-S permitir plenitude na flexibilidade de posicionamento de soldagem. Por essa razão, exige-se certificação adicional dos soldadores e projetistas de juntas.

Para o propósito de descoberta dos parâmetros que resultavam em um melhor aspecto de filete, geometria triangular convexa de reforço mínimo, variaram-se os seguintes parâmetros primários: tensão de soldagem (17, 19, 21 e 23 V), velocidade de soldagem (5, 7 e 9 mm/s), velocidade de alimentação do arame (5, 6, 7 e 8 m/min), de acordo com faixas de valores de operação de GMAW-S, como indicam a Figura 3.9. A combinação dos parâmetros de entrada primários gera 48 experimentos de acordo com o planejamento fatorial, ou seja, englobam-se todas as combinações dos níveis de todos os fatores envolvidos.

Usualmente, utiliza-se o conjunto de dados de um experimento para gerar a média de valores dos parâmetros de entrada para o cálculo de probabilidades, ou seja, cada ensaio gera um valor médio de parâmetros de entrada e um valor médio de largura do cordão de solda.

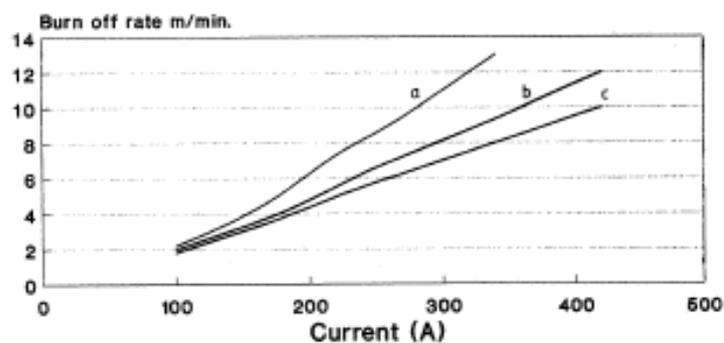


Figura 3.9 - Correlação entre *stick out* (a: 5 mm, b: 10 mm, c: 20 mm) e  $I_s$  para eletrodo de 1,2 mm de diâmetro (NORRISH, 1992).

Desta forma, uma junta tipo T recebe 3 cordões de solda de 55 mm, ver Figura 3.10, cada um com seu valor de  $U_s$  e WFS, variando o WS em 5, 7 e 9 mm/s, e o ângulo de trabalho de 46°, 43° e 40°, respectivamente. A alteração do ângulo de trabalho da tocha foi decidida após experimentos que acusaram escorrimento da poça de fusão para um mesmo ângulo de trabalho e diferente densidade de energia inserida na poça de fusão.

Tabela 3.6 - Planejamento fatorial.

| Secção | U <sub>s</sub> | WS  | WFS | Secção | U <sub>s</sub> | WS  | WFS | Secção | U <sub>s</sub> | WS  | WFS |
|--------|----------------|-----|-----|--------|----------------|-----|-----|--------|----------------|-----|-----|
| 1      | 17,0           | 5,0 | 5,0 | 17     | 19,0           | 7,0 | 6,0 | 33     | 21,0           | 9,0 | 7,0 |
| 2      | 17,0           | 7,0 | 5,0 | 18     | 19,0           | 9,0 | 6,0 | 34     | 21,0           | 5,0 | 8,0 |
| 3      | 17,0           | 9,0 | 5,0 | 19     | 19,0           | 5,0 | 7,0 | 35     | 21,0           | 7,0 | 8,0 |
| 4      | 17,0           | 5,0 | 6,0 | 20     | 19,0           | 7,0 | 7,0 | 36     | 21,0           | 9,0 | 8,0 |
| 5      | 17,0           | 7,0 | 6,0 | 21     | 19,0           | 9,0 | 7,0 | 37     | 23,0           | 5,0 | 5,0 |
| 6      | 17,0           | 9,0 | 6,0 | 22     | 19,0           | 5,0 | 8,0 | 38     | 23,0           | 7,0 | 5,0 |
| 7      | 17,0           | 5,0 | 7,0 | 23     | 19,0           | 7,0 | 8,0 | 39     | 23,0           | 9,0 | 5,0 |
| 8      | 17,0           | 7,0 | 7,0 | 24     | 19,0           | 9,0 | 8,0 | 40     | 23,0           | 5,0 | 6,0 |
| 9      | 17,0           | 9,0 | 7,0 | 25     | 21,0           | 5,0 | 5,0 | 41     | 23,0           | 7,0 | 6,0 |
| 10     | 17,0           | 5,0 | 8,0 | 26     | 21,0           | 7,0 | 5,0 | 42     | 23,0           | 9,0 | 6,0 |
| 11     | 17,0           | 7,0 | 8,0 | 27     | 21,0           | 9,0 | 5,0 | 43     | 23,0           | 5,0 | 7,0 |
| 12     | 17,0           | 9,0 | 8,0 | 28     | 21,0           | 5,0 | 6,0 | 44     | 23,0           | 7,0 | 7,0 |
| 13     | 19,0           | 5,0 | 5,0 | 29     | 21,0           | 7,0 | 6,0 | 45     | 23,0           | 9,0 | 7,0 |
| 14     | 19,0           | 7,0 | 5,0 | 30     | 21,0           | 9,0 | 6,0 | 46     | 23,0           | 5,0 | 8,0 |
| 15     | 19,0           | 9,0 | 5,0 | 31     | 21,0           | 5,0 | 7,0 | 47     | 23,0           | 7,0 | 8,0 |
| 16     | 19,0           | 5,0 | 6,0 | 32     | 21,0           | 7,0 | 7,0 | 48     | 23,0           | 9,0 | 8,0 |

Cada junta recebeu 3 cordões em posições intercaladas, variando os valores de velocidades entre eles. Dessa forma, reduziu-se o número de experimentos do planejamento fatorial em um total para 16 juntas, executadas de forma aleatória entre os valores da Tabela 3.6.

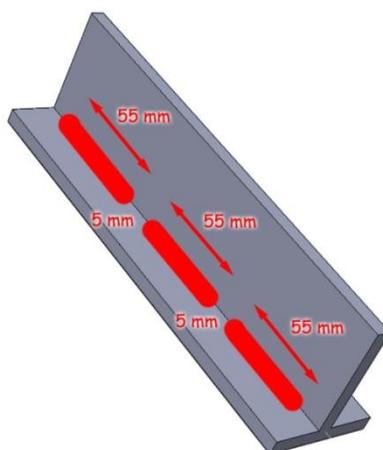


Figura 3.10 - Esquema das distribuições dos cordões de solda na junta tipo T.

Enumeraram-se as juntas de acordo com o número de cordões para medição do perfil do filete, de 1 a 48, utilizando o punção numérico de aço. Cada cordão foi seccionado utilizando uma serra de fita Franho FM 500, ver Figura 3.11, com aproximadamente 0,9 mm de espessura na serra.



Figura 3.11 - Franho FM 500 em corte de junta tipo T.

Cada secção gerou duas faces de perfil, separado em 0,9 mm, ver Figura 3.12 e Figura 3.14, com os mesmos parâmetros médios de entrada,  $U_s$ ,  $WS$  e  $WFS$ . Ambas as faces foram medidas no projetor de perfil, ver Figura 3.13, para calcular o valor médio de largura do filete para uma dada combinação de parâmetros médios de entrada.



Figura 3.12 - Cordão de solda intermitente e junta seccionada.

Dos 48 experimentos efetuados, 3 ocasionaram em fusão incompleta do cordão de solda e descarte da junta.

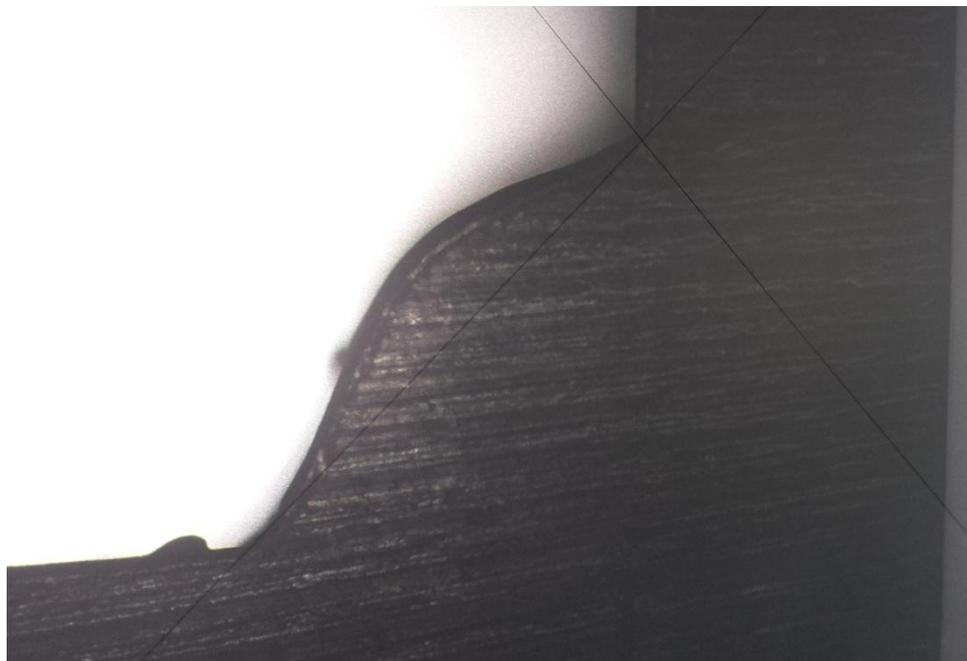


Figura 3.13 - Visualização do perfil do filete no projetor.

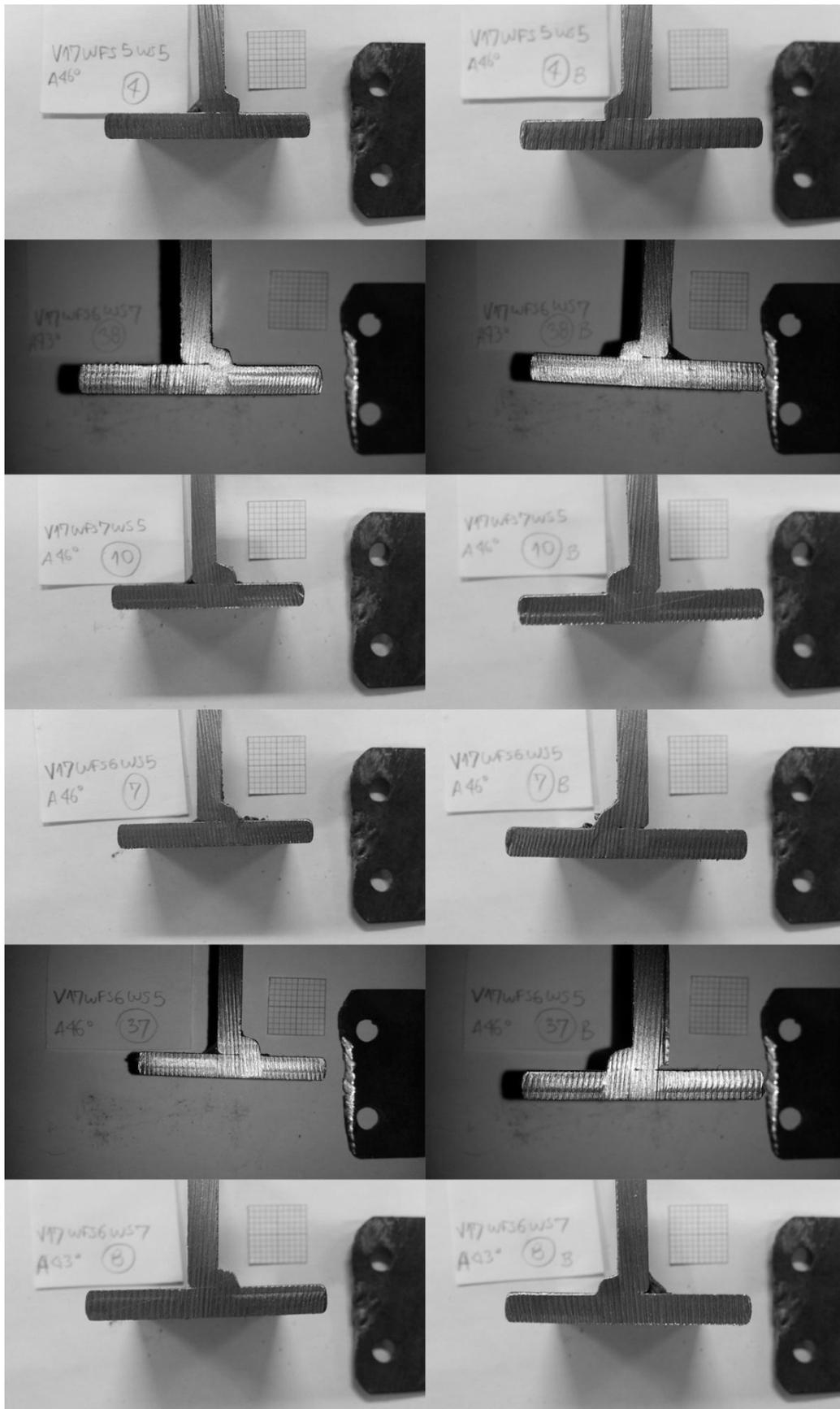


Figura 3.14 - Amostra de perfis de filetes obtidos.

Realizaram-se medições de perna horizontal, perna vertical, largura do filete e distorção da junta pós-solda, com valor médio de 89,41°, desvio-padrão de 1,208 e coeficiente de variação de 0,014. Obtiveram-se os seguintes resultados:

Tabela 3.7 - Dimensões obtidas do perfil dos filetes no projetor.

| Secção | Perna horizontal média [mm] | Perna vertical média [mm] | Largura filete média [mm] | Distorção média [°] |
|--------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------|
| 1      | 6,161                       | 7,258                     | 9,521                     | 90,789              |
| 2      | 5,024                       | 5,779                     | 7,664                     | 90,166              |
| 3      | 4,982                       | 4,706                     | 6,853                     | 90,866              |
| 4      | 3,657                       | 6,204                     | 7,202                     | 90,188              |
| 5      | 2,995                       | 5,997                     | 6,708                     | 90,295              |
| 6      | 2,609                       | 5,311                     | 5,917                     | 90,431              |
| 7      | 7,207                       | 7,549                     | 10,443                    | 88,103              |
| 8      | 6,264                       | 6,343                     | 8,916                     | 87,297              |
| 9      | 5,820                       | 5,510                     | 8,018                     | 86,823              |
| 10     | 5,305                       | 5,634                     | 7,740                     | 87,308              |
| 11     | 4,984                       | 4,157                     | 6,491                     | 86,893              |
| 12     | 4,562                       | 3,968                     | 6,048                     | 87,208              |
| 13     | 5,644                       | 5,109                     | 7,613                     | 90,431              |
| 14     | 5,161                       | 4,488                     | 6,840                     | 89,910              |
| 15     | 4,662                       | 3,795                     | 6,011                     | 91,284              |
| 16     | 6,785                       | 7,412                     | 10,053                    | 90,208              |
| 17     | 5,108                       | 6,635                     | 8,374                     | 90,105              |
| 18     | 5,207                       | 5,542                     | 7,608                     | 90,098              |
| 19     | 4,976                       | 6,208                     | 7,956                     | 88,585              |
| 20     | 4,389                       | 5,383                     | 6,946                     | 88,297              |
| 21     | 3,955                       | 4,510                     | 5,999                     | 88,248              |
| 22     | -                           | -                         | -                         | -                   |
| 23     | -                           | -                         | -                         | -                   |
| 24     | -                           | -                         | -                         | -                   |
| 25     | 6,054                       | 5,642                     | 8,276                     | 89,294              |
| 26     | 5,368                       | 4,739                     | 7,165                     | 89,044              |
| 27     | 5,129                       | 4,408                     | 6,767                     | 89,182              |
| 28     | 6,000                       | 5,883                     | 8,404                     | 91,278              |
| 29     | 5,277                       | 4,862                     | 7,176                     | 91,809              |
| 30     | 4,856                       | 4,238                     | 6,447                     | 89,814              |
| 31     | 6,309                       | 6,519                     | 9,075                     | 89,863              |
| 32     | 5,072                       | 6,138                     | 7,962                     | 89,808              |
| 33     | 5,095                       | 4,600                     | 6,880                     | 89,839              |
| 34     | 5,284                       | 6,818                     | 8,626                     | 89,400              |
| 35     | 4,942                       | 5,696                     | 7,541                     | 89,069              |
| 36     | 4,833                       | 4,547                     | 6,636                     | 89,367              |
| 37     | 5,682                       | 6,341                     | 8,515                     | 89,094              |

|    |       |       |       |        |
|----|-------|-------|-------|--------|
| 38 | 5,473 | 5,336 | 7,684 | 87,754 |
| 39 | 4,853 | 5,333 | 7,213 | 88,322 |
| 40 | 5,617 | 6,074 | 8,274 | 89,820 |
| 41 | 5,191 | 5,196 | 7,346 | 90,192 |
| 42 | 5,133 | 4,350 | 6,729 | 89,329 |
| 43 | 6,343 | 7,519 | 9,838 | 90,232 |
| 44 | 5,456 | 6,093 | 8,180 | 90,733 |
| 45 | 5,346 | 5,170 | 7,440 | 90,125 |
| 46 | 6,106 | 6,270 | 8,753 | 88,698 |
| 47 | 5,622 | 6,387 | 8,512 | 89,308 |
| 48 | 5,201 | 4,793 | 7,112 | 88,693 |

Agruparam-se os filetes com largura 5, 6, 7, 8, 9 e 10 mm, desconsiderando as casas decimais, calculadas as médias, desvios padrão e coeficientes de variação.

Tabela 3.8 - Avaliação estatística das dimensões dos filetes.

| Largura filete<br>grupos [mm]<br>$w$ | Número de<br>eventos | P[W=w] | Média de<br>largura [mm]<br>$\bar{w}$ | Desvio-padrão<br>$\sigma$ | Coefficiente de<br>Variação<br>$\sigma/\bar{w}$ |
|--------------------------------------|----------------------|--------|---------------------------------------|---------------------------|---|
| -                                    | 3                    | 6,25%  | -                                     | -                         | -   |
| 5                                    | 2                    | 4,17%  | 5,958                                 | 0,058                     | 0,010   |
| 6                                    | 12                   | 25,00% | 6,613                                 | 0,311                     | 0,047   |
| 7                                    | 15                   | 31,25% | 7,495                                 | 0,284                     | 0,038   |
| 8                                    | 11                   | 22,92% | 8,441                                 | 0,260                     | 0,031   |
| 9                                    | 3                    | 6,25%  | 9,478                                 | 0,383                     | 0,040   |
| 10                                   | 2                    | 4,17%  | 10,248                                | 0,276                     | 0,027   |

Para aplicação da regra de Bayes, é necessário o conhecimento do universo experimental para o cálculo das probabilidades condicionais e, a partir daí, encontrar a distribuição de probabilidade das larguras de filete desejadas dado um conjunto de IWP.

Tabela 3.9 - Número de eventos por IWP.

| Us<br>[V] | Nº de<br>eventos | P[U <sub>S1</sub> =u <sub>s1</sub> ] | WS<br>[mm/s] | Nº de<br>eventos | P[WS <sub>1</sub> =ws <sub>1</sub> ] | WFS<br>[m/min] | Nº de<br>eventos | P[WFS <sub>1</sub> =wfs <sub>1</sub> ] |
|-----------|------------------|--------------------------------------|--------------|------------------|--------------------------------------|----------------|------------------|--|
| 17        | 12               | 25,00%                               | 5            | 16               | 33,33%                               | 5              | 12               | 25,00%                                 |
| 19        | 12               | 25,00%                               | 7            | 16               | 33,33%                               | 6              | 12               | 25,00%                                 |
| 21        | 12               | 25,00%                               | 9            | 16               | 33,33%                               | 7              | 12               | 25,00%                                 |
| 23        | 12               | 25,00%                               |              |                  |                                      | 8              | 12               | 25,00%                                 |

Considerando a Regra de Bayes, descrita na Equação 2.10, para a análise desses experimentos, com IWP igual a  $U_s$ , WS e WFS, tem-se:

$$P[W = w|IWP = iwp] = \frac{P[iwp|w] \cdot P[w]}{P[\text{total } iwp]} \quad (3.1)$$

A análise se dá para cada IWP (US, WS e WFS), e para cada valor de largura de filete (W). Desta forma, tem-se como conhecimento *a priori* do universo os valores apresentados nas Tabela 3.10, Tabela 3.11 e Tabela 3.12.

Tabela 3.10 - Tensão de soldagem e largura do filete.

| Probabilidades condicionais a priori de $U_s$ e W |        |                      |        |
|---|--------|----------------------|--------|
| <b>P(V=17 W=5)</b>                                | 50,00% | <b>P(V=19 W=5)</b>   | 50,00% |
| <b>P(V=17 W=6)</b>                                | 50,00% | <b>P(V=19 W=6)</b>   | 25,00% |
| <b>P(V=17 W=7)</b>                                | 26,67% | <b>P(V=19 W=7)</b>   | 20,00% |
| <b>P(V=17 W=8)</b>                                | 18,18% | <b>P(V=19 W=8)</b>   | 9,09%  |
| <b>P(V=17 W=9)</b>                                | 33,33% | <b>P(V=19 W=9)</b>   | 0,00%  |
| <b>P(V=17 W=10)</b>                               | 50,00% | <b>P(V=19 W=10)</b>  | 50,00% |
| <b>P(total V=17)</b>                              | 31,25% | <b>P(total V=19)</b> | 18,75% |
| <b>P(V=21 W=5)</b>                                | 0,00%  | <b>P(V=23 W=5)</b>   | 0,00%  |
| <b>P(V=21 W=6)</b>                                | 33,33% | <b>P(V=23 W=6)</b>   | 8,33%  |
| <b>P(V=21 W=7)</b>                                | 26,67% | <b>P(V=23 W=7)</b>   | 33,33% |
| <b>P(V=21 W=8)</b>                                | 27,27% | <b>P(V=23 W=8)</b>   | 45,45% |
| <b>P(V=21 W=9)</b>                                | 33,33% | <b>P(V=23 W=9)</b>   | 33,33% |
| <b>P(V=21 W=10)</b>                               | 0,00%  | <b>P(V=23 W=10)</b>  | 0,00%  |
| <b>P(total V=21)</b>                              | 25,00% | <b>P(total V=23)</b> | 25,00% |

Tabela 3.11 - Velocidade de soldagem e largura do filete.

| Probabilidades condicionais a priori de WS e W |         |                      |        |                      |         |
|--|---------|----------------------|--------|----------------------|---------|
| <b>P(WS=5 W=5)</b>                             | 0,00%   | <b>P(WS=7 W=5)</b>   | 0,00%  | <b>P(WS=9 W=5)</b>   | 100,00% |
| <b>P(WS=5 W=6)</b>                             | 0,00%   | <b>P(WS=7 W=6)</b>   | 41,67% | <b>P(WS=9 W=6)</b>   | 75,00%  |
| <b>P(WS=5 W=7)</b>                             | 33,33%  | <b>P(WS=7 W=7)</b>   | 46,67% | <b>P(WS=9 W=7)</b>   | 26,67%  |
| <b>P(WS=5 W=8)</b>                             | 54,55%  | <b>P(WS=7 W=8)</b>   | 36,36% | <b>P(WS=9 W=8)</b>   | 9,09%   |
| <b>P(WS=5 W=9)</b>                             | 100,00% | <b>P(WS=7 W=9)</b>   | 0,00%  | <b>P(WS=9 W=9)</b>   | 0,00%   |
| <b>P(WS=5 W=10)</b>                            | 100,00% | <b>P(WS=7 W=10)</b>  | 0,00%  | <b>P(WS=9 W=10)</b>  | 0,00%   |
| <b>P(total WS=5)</b>                           | 33,33%  | <b>P(total WS=7)</b> | 33,33% | <b>P(total WS=9)</b> | 33,33%  |

Tabela 3.12 - Velocidade de alimentação do arame e largura do filete.

| Probabilidades condicionais a priori de WFS e W |        |                       |        |
|---|--------|-----------------------|--------|
| <b>P(WFS=5 W=5)</b>                             | 0,00%  | <b>P(WFS=6 W=5)</b>   | 50,00% |
| <b>P(WFS=5 W=6)</b>                             | 50,00% | <b>P(WFS=6 W=6)</b>   | 25,00% |
| <b>P(WFS=5 W=7)</b>                             | 40,00% | <b>P(WFS=6 W=7)</b>   | 26,67% |
| <b>P(WFS=5 W=8)</b>                             | 18,18% | <b>P(WFS=6 W=8)</b>   | 27,27% |
| <b>P(WFS=5 W=9)</b>                             | 33,33% | <b>P(WFS=6 W=9)</b>   | 0,00%  |
| <b>P(WFS=5 W=10)</b>                            | 0,00%  | <b>P(WFS=6 W=10)</b>  | 50,00% |
| <b>P(total WFS=5)</b>                           | 31,25% | <b>P(total WFS=6)</b> | 25,00% |
| <b>P(WFS=7 W=5)</b>                             | 50,00% | <b>P(WFS=8 W=5)</b>   | 0,00%  |
| <b>P(WFS=7 W=6)</b>                             | 16,67% | <b>P(WFS=8 W=6)</b>   | 25,00% |
| <b>P(WFS=7 W=7)</b>                             | 20,00% | <b>P(WFS=8 W=7)</b>   | 20,00% |
| <b>P(WFS=7 W=8)</b>                             | 27,27% | <b>P(WFS=8 W=8)</b>   | 27,27% |
| <b>P(WFS=7 W=9)</b>                             | 66,67% | <b>P(WFS=8 W=9)</b>   | 0,00%  |
| <b>P(WFS=7 W=10)</b>                            | 50,00% | <b>P(WFS=8 W=10)</b>  | 0,00%  |
| <b>P(total WFS=7)</b>                           | 25,00% | <b>P(total WFS=8)</b> | 18,75% |

A partir desse conhecimento *a priori*, com o cálculo dos valores advindos da análise empírica, e aplicando a Regra de Bayes através da Equação (2.1), têm-se os valores *a posteriori* de largura de filete dado parâmetros de entrada (ver Como resultado, o método gerou três tabelas (Tabela 3.13, Tabela 3.14, Tabela 3.15), e posteriormente seus respectivos gráficos (Figura 3.15, Figura 3.16, e Figura 3.17), com o intuito de facilitar a escolha de parâmetros por parte dos soldadores. A combinação do uso dos três gráficos busca ampliar as chances de se obter um filete de largura conforme descrita no projeto. Apesar das tabelas evidenciarem a relação que compõe a probabilidade condicional, como por exemplo “qual a probabilidade de se obter uma largura de filete de 8 mm, dado que o valor da tensão elétrica de soldagem seja 17 V?”, a forma de gráfico é mais intuitiva, pois permite que o soldador encontre no eixo horizontal o valor de largura do filete requerido para o projeto. A partir daí, procura-se o círculo de maior área, consequentemente de maior probabilidade, para encontrar a contrapartida de valor da variável relacionada no eixo vertical.

Por exemplo, a partir de um projeto simples de junta tipo T que solicita um filete de 8 mm de largura, o soldador pode encontrar um melhor direcionamento da configuração das variáveis tensão elétrica de soldagem, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação do arame utilizando as Figura 3.15, Figura 3.16, e Figura 3.17. Assim, para um filete de 8 mm de largura, valor que pode ser encontrado no eixo horizontal das figuras em questão,

procura-se o círculo de maior área para cada uma das variáveis  $U_s$ ,  $WS$  e  $WFS$ , ou seja, em cada um dos gráficos. Para  $U_s$ , apresentado na Figura 3.15, o círculo de maior área indica o valor de 23 V no eixo vertical. Para  $WS$ , apresentado na Figura 3.16, o círculo de maior área indica o valor de 5 mm/s. Para  $WFS$ , apresentado na Figura 3.17, o círculo de maior área indica o valor de 8 m/min. Ao combinar as variáveis encontradas no eixo vertical de cada uma das figuras, tem-se uma direção prévia da configuração do processo de soldagem, ou seja, há maior chance de se obter o filete de 8 mm de largura com os valores de  $U_s = 23$  V,  $WS = 5$  mm/s e  $WFS = 8$  m/min.

As demais variáveis que também influenciam a geometria final do filete não são tratadas pelas probabilidades condicionais calculadas pela Regra Bayes. As sugestões, boas práticas e métodos de pré-qualificação e qualificação do cordão de solda incluem fundamentações mais extensas e complexas, como apresenta o código AWS D1.1 e literaturas a respeito de projetos de juntas para aço estrutural, por exemplo.

Tabela 3.13, Tabela 3.14, Tabela 3.15 e Figura 3.15, Figura 3.16 e Figura 3.17), como ilustra o exemplo das Equações (3.2, 3.3, 3.4 e 3.5).

$$P[W = 5|U_s = 17] = \frac{P[U_s=17|W=5] \cdot P[W=5]}{P[\text{total } U_s]} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} P[\text{total } U_s] = & \\ & P[U_s = 17|W = 5] \cdot P[W = 5] + P[U_s = 17|W = 6] \cdot P[W = 6] + \\ & P[U_s = 17|W = 7] \cdot P[W = 7] + P[U_s = 17|W = 8] \cdot P[W = 8] + \\ & P[U_s = 17|W = 9] \cdot P[W = 9] + P[U_s = 17|W = 10] \cdot P[W = 10] \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} P[W = 5|U_s = 17] = & \\ & \frac{0,5 \cdot 0,0417}{0,5 \cdot 0,0417 + 0,5 \cdot 0,25 + 0,2667 \cdot 0,3125 + 0,1818 \cdot 0,2292 + 0,3333 \cdot 0,0625 + 0,5 \cdot 0,0417 + 0 \cdot 0,0625} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$P[W = 5|U_s = 17] = 0,0667 \quad (3.5)$$

Como resultado, o método gerou três tabelas (Tabela 3.13, Tabela 3.14, Tabela 3.15), e posteriormente seus respectivos gráficos (Figura 3.15, Figura 3.16, e Figura 3.17), com o intuito de facilitar a escolha de parâmetros por parte dos soldadores. A combinação do uso dos três gráficos busca ampliar as chances de se obter um filete de largura conforme descrita no projeto. Apesar das tabelas evidenciarem a relação que compõe a probabilidade condicional, como por exemplo “qual a probabilidade de se obter uma largura de filete de 8 mm, dado que o valor da tensão elétrica de soldagem seja 17 V?”, a forma de gráfico é mais intuitiva, pois permite que o soldador encontre no eixo horizontal o valor de largura do filete requerido para o projeto. A partir daí, procura-se o círculo de maior área, conseqüentemente de maior probabilidade, para encontrar a contrapartida de valor da variável relacionada no eixo vertical.

Por exemplo, a partir de um projeto simples de junta tipo T que solicita um filete de 8 mm de largura, o soldador pode encontrar um melhor direcionamento da configuração das variáveis tensão elétrica de soldagem, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação do arame utilizando as Figura 3.15, Figura 3.16, e Figura 3.17. Assim, para um filete de 8 mm de largura, valor que pode ser encontrado no eixo horizontal das figuras em questão, procura-se o círculo de maior área para cada uma das variáveis  $U_s$ ,  $W_S$  e  $W_{FS}$ , ou seja, em cada um dos gráficos. Para  $U_s$ , apresentado na Figura 3.15, o círculo de maior área indica o valor de 23 V no eixo vertical. Para  $W_S$ , apresentado na Figura 3.16, o círculo de maior área indica o valor de 5 mm/s. Para  $W_{FS}$ , apresentado na Figura 3.17, o círculo de maior área indica o valor de 8 m/min. Ao combinar as variáveis encontradas no eixo vertical de cada uma das figuras, tem-se uma direção prévia da configuração do processo de soldagem, ou seja, há maior chance de se obter o filete de 8 mm de largura com os valores de  $U_s = 23$  V,  $W_S = 5$  mm/s e  $W_{FS} = 8$  m/min.

As demais variáveis que também influenciam a geometria final do filete não são tratadas pelas probabilidades condicionais calculadas pela Regra Bayes. As sugestões, boas práticas e métodos de pré-qualificação e qualificação do cordão de solda incluem fundamentações mais extensas e complexas, como apresenta o código AWS D1.1 e literaturas a respeito de projetos de juntas para aço estrutural, por exemplo.

Tabela 3.13 - Largura do filete por tensão de soldagem.

| Probabilidades condicionais a posteriori de $U_s$ e $W$ |        |               |        |                |        |
|---|--------|---------------|--------|----------------|--------|
| $P(W=5 V=17)$   | 6,67%  | $P(W=6 V=17)$ | 40,00% | $P(W=7 V=17)$  | 26,67% |
| $P(W=5 V=19)$   | 11,11% | $P(W=6 V=19)$ | 33,33% | $P(W=7 V=19)$  | 33,33% |
| $P(W=5 V=21)$   | 0,00%  | $P(W=6 V=21)$ | 33,33% | $P(W=7 V=21)$  | 33,33% |
| $P(W=5 V=23)$   | 0,00%  | $P(W=6 V=23)$ | 8,33%  | $P(W=7 V=23)$  | 41,67% |
| $P(W=8 V=17)$   | 13,33% | $P(W=9 V=17)$ | 6,67%  | $P(W=10 V=17)$ | 6,67%  |
| $P(W=8 V=19)$   | 11,11% | $P(W=9 V=19)$ | 0,00%  | $P(W=10 V=19)$ | 11,11% |
| $P(W=8 V=21)$   | 25,00% | $P(W=9 V=21)$ | 8,33%  | $P(W=10 V=21)$ | 0,00%  |
| $P(W=8 V=23)$   | 41,67% | $P(W=9 V=23)$ | 8,33%  | $P(W=10 V=23)$ | 0,00%  |

Como resultado, o método gerou três tabelas (Tabela 3.13, Tabela 3.14, Tabela 3.15), e posteriormente seus respectivos gráficos (Figura 3.15, Figura 3.16, e Figura 3.17), com o intuito de facilitar a escolha de parâmetros por parte dos soldadores. A combinação do uso dos três gráficos busca ampliar as chances de se obter um filete de largura conforme descrita no projeto. Apesar das tabelas evidenciarem a relação que compõe a probabilidade condicional, como por exemplo “qual a probabilidade de se obter uma largura de filete de 8 mm, dado que o valor da tensão elétrica de soldagem seja 17 V?”, a forma de gráfico é mais intuitiva, pois permite que o soldador encontre no eixo horizontal o valor de largura do filete requerido para o projeto. A partir daí, procura-se o círculo de maior área, conseqüentemente de maior probabilidade, para encontrar a contrapartida de valor da variável relacionada no eixo vertical.

Por exemplo, a partir de um projeto simples de junta tipo T que solicita um filete de 8 mm de largura, o soldador pode encontrar um melhor direcionamento da configuração das variáveis tensão elétrica de soldagem, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação do arame utilizando as Figura 3.15, Figura 3.16, e Figura 3.17. Assim, para um filete de 8 mm de largura, valor que pode ser encontrado no eixo horizontal das figuras em questão, procura-se o círculo de maior área para cada uma das variáveis  $U_s$ ,  $W_s$  e  $W_{fs}$ , ou seja, em cada um dos gráficos. Para  $U_s$ , apresentado na Figura 3.15, o círculo de maior área indica o valor de 23 V no eixo vertical. Para  $W_s$ , apresentado na Figura 3.16, o círculo de maior área indica o valor de 5 mm/s. Para  $W_{fs}$ , apresentado na Figura 3.17, o círculo de maior área indica o valor de 8 m/min. Ao combinar as variáveis encontradas no eixo vertical de cada uma das figuras, tem-se uma direção prévia da configuração do processo de soldagem, ou seja, há maior chance de se obter o filete de 8 mm de largura com os valores de  $U_s = 23$  V,  $W_s = 5$  mm/s e  $W_{fs} = 8$  m/min.

As demais variáveis que também influenciam a geometria final do filete não são tratadas pelas probabilidades condicionais calculadas pela Regra Bayes. As sugestões, boas práticas e métodos de pré-qualificação e qualificação do cordão de solda incluem fundamentações mais extensas e complexas, como apresenta o código AWS D1.1 e literaturas a respeito de projetos de juntas para aço estrutural, por exemplo.

Tabela 3.13 é apresentada em forma de gráfico, como mostra a Figura 3.15.

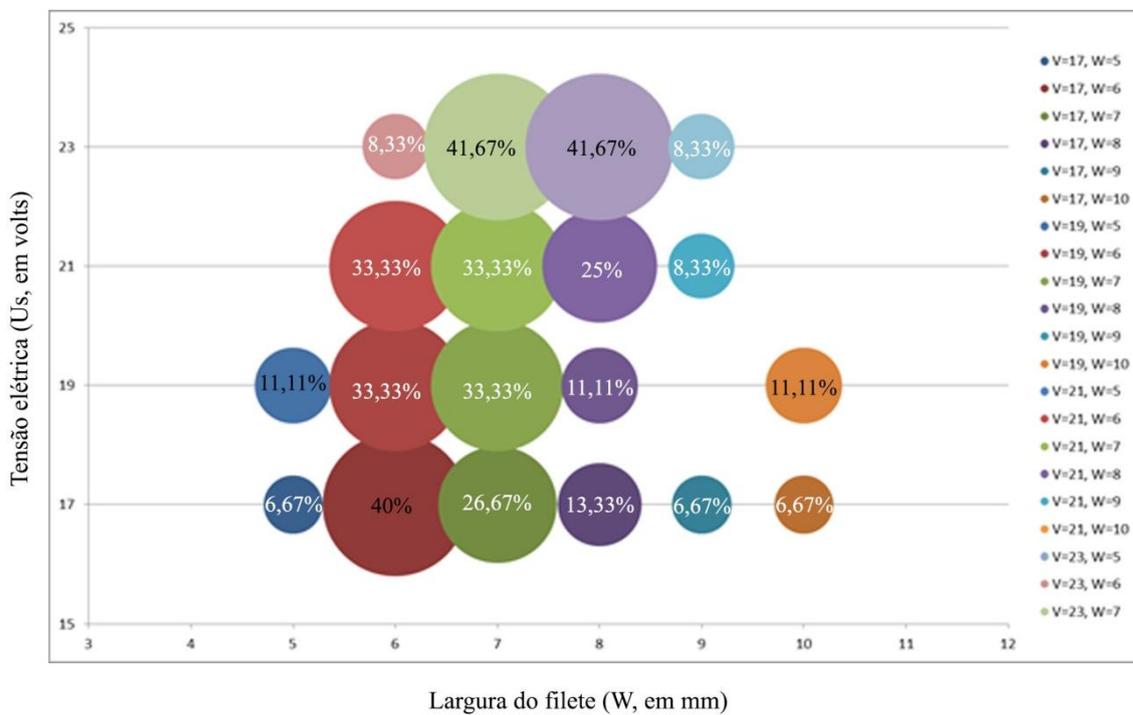


Figura 3.15 - Distribuição de tensão de soldagem por largura do filete.

Com a largura do filete requerida para o projeto, o soldador, principalmente aquele menos experiente, pode direcionar a configuração das variáveis de entrada mais prováveis, ou seja, de maior área nos círculos, para cada largura de filete. Para isso, escolhem-se, no eixo horizontal da Figura 3.15, Figura 3.16, e Figura 3.17, os valores de tensão elétrica de soldagem, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação do arame com maior probabilidade de resultar na largura do filete requerida.

Tabela 3.14 - Largura do filete por velocidade de soldagem.

| Probabilidades condicionais a posteriori de WS e W |        |               |        |                |        |
|--|--------|---------------|--------|----------------|--------|
| $P(W=5 WS=5)$                                      | 0,00%  | $P(W=6 WS=5)$ | 0,00%  | $P(W=7 WS=5)$  | 31,25% |
| $P(W=5 WS=7)$                                      | 0,00%  | $P(W=6 WS=7)$ | 31,25% | $P(W=7 WS=7)$  | 43,75% |
| $P(W=5 WS=9)$                                      | 12,50% | $P(W=6 WS=9)$ | 56,25% | $P(W=7 WS=9)$  | 25,00% |
| $P(W=8 WS=5)$                                      | 37,50% | $P(W=9 WS=5)$ | 18,75% | $P(W=10 WS=5)$ | 12,50% |
| $P(W=8 WS=7)$                                      | 25,00% | $P(W=9 WS=7)$ | 0,00%  | $P(W=10 WS=7)$ | 0,00%  |
| $P(W=8 WS=9)$                                      | 6,25%  | $P(W=9 WS=9)$ | 0,00%  | $P(W=10 WS=9)$ | 0,00%  |

A Tabela 3.14 é apresentada em forma de gráfico, como mostra a Figura 3.16.

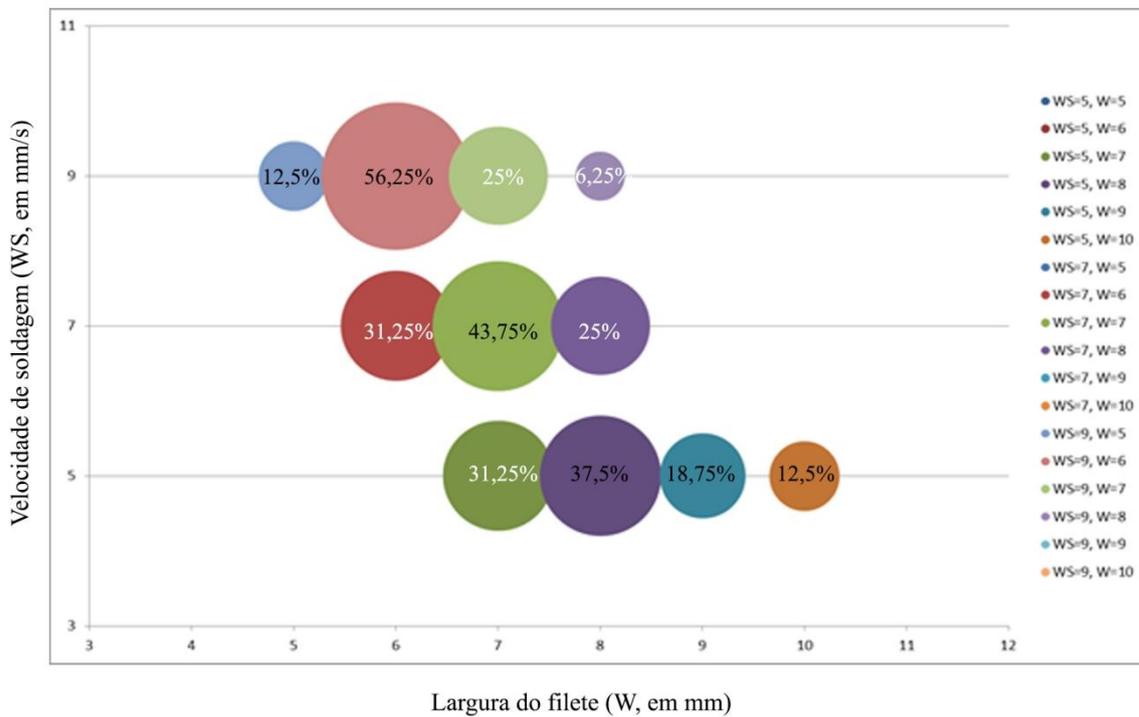


Figura 3.16 - Distribuição de velocidade de soldagem por largura do filete.

A Figura 3.15, a Figura 3.16, e a Figura 3.17 também mostram que, para determinados valores de largura alguns dos valores das variáveis de entrada não resultam em filete, ou união da junta, apresentado pela probabilidade de 0% (sem círculo nos gráficos).

Tabela 3.15 - Largura do filete por velocidade de alimentação do arame.

| Probabilidades condicionais a posteriori de WFS e W |        |                |        |                 |        |
|---|--------|----------------|--------|-----------------|--------|
| $P(W=5 WFS=5)$                                      | 0,00%  | $P(W=6 WFS=5)$ | 40,00% | $P(W=7 WFS=5)$  | 40,00% |
| $P(W=5 WFS=6)$                                      | 8,33%  | $P(W=6 WFS=6)$ | 25,00% | $P(W=7 WFS=6)$  | 33,33% |
| $P(W=5 WFS=7)$                                      | 8,33%  | $P(W=6 WFS=7)$ | 16,67% | $P(W=7 WFS=7)$  | 25,00% |
| $P(W=5 WFS=8)$                                      | 0,00%  | $P(W=6 WFS=8)$ | 33,33% | $P(W=7 WFS=8)$  | 33,33% |
| $P(W=8 WFS=5)$                                      | 13,33% | $P(W=9 WFS=5)$ | 6,67%  | $P(W=10 WFS=5)$ | 0,00%  |
| $P(W=8 WFS=6)$                                      | 25,00% | $P(W=9 WFS=6)$ | 0,00%  | $P(W=10 WFS=6)$ | 8,33%  |
| $P(W=8 WFS=7)$                                      | 25,00% | $P(W=9 WFS=7)$ | 16,67% | $P(W=10 WFS=7)$ | 8,33%  |
| $P(W=8 WFS=8)$                                      | 33,33% | $P(W=9 WFS=8)$ | 0,00%  | $P(W=10 WFS=8)$ | 0,00%  |

A Tabela 3.15 é apresentada em forma de gráfico, como mostra a Figura 3.17.

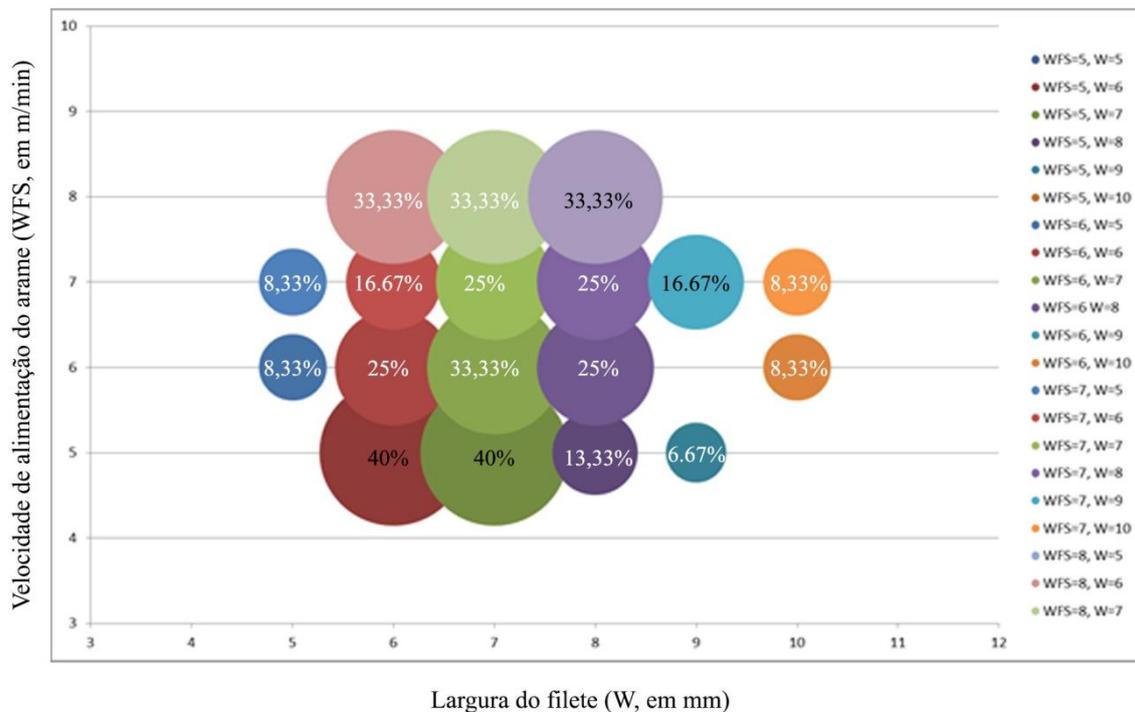


Figura 3.17 - Distribuição de velocidade de alimentação do arame por largura do filete.

Com os valores de larguras de filete, ver Tabela 3.16, calculam-se as pernas e gargantas teóricas do perfil e, por consequência, a capacidade do cordão (vide Apêndice A).

Tabela 3.16 - Relação W, l e t para GMAW-S.

| Largura W [mm] | Perna l [mm] | Garganta teórica t [mm] |
|----------------|--------------|-------------------------|
| 5              | 3,5          | 2,5                     |
| 6              | 4,2          | 3,0                     |
| 7              | 4,9          | 3,5                     |
| 8              | 5,6          | 4,0                     |
| 9              | 6,3          | 4,5                     |
| 10             | 7,0          | 5,0                     |

## 4 - DISCUSSÕES DE RESULTADOS

O projeto de junta exige, fundamentalmente, do valor da largura do filete para calcular a capacidade da junta soldada. A partir dos valores de largura de filete desejado, e com a utilização da filosofia bayesiana, é possível encontrar a combinação indicada dos parâmetros de entrada que atenda a intenção do soldador.

Os resultados apresentados, principalmente através dos gráficos da Figura 3.15, da Figura 3.16 e Figura 3.17 indicam a distribuição de larguras de filete considerando os parâmetros de entrada individuais. É fácil de visualizar que a combinação para se atingir  $W = 6$  mm, por exemplo, indica que o soldador tem opção dos valores,  $U_S = 21, 19$  ou  $17$  V,  $WS = 9$  e  $6$  mm/s e  $WFS = 8, 7, 6$  ou  $5$  m/min. Optando para as entradas de maiores probabilidades, com círculo de maior área no gráfico, uma configuração de  $U_S = 17$ ,  $WS = 9$  e  $WFS = 5$  aponta grande probabilidade de que se alcance  $W = 6$  mm.

A utilização do ponteamto do metal base e alma, de cordões intermitentes sem o uso de chanfro, como sugere Coraini *et al.* (2011), contribuíram para a redução de distorções da junta de ângulo em  $90^\circ$ . Os desvios encontrados nos ensaios, considerada a metrologia de medição do ângulo na junta, são próximos do que se espera para uma junta tipo T.

Os experimentos foram feitos sobre uma combinação única de gás de proteção, *Stargold* 94% Ar + 6% CO<sub>2</sub>, combinando efeitos de estreitamento na largura do cordão e melhor definição em seu contorno. Não foi possível comparar as implicações de outras misturas de gás de proteção nos resultados de largura dos filetes. No mercado brasileiro, é comum a comercialização de gás em misturas de argônio, principalmente na proporção 94% Ar + 6% CO<sub>2</sub> para GMAW. Misturas do tipo 75% Ar + 25% CO<sub>2</sub> (conhecida como C25), 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub>, 100% CO<sub>2</sub> e 98% Ar + 2% O<sub>2</sub> possuem oferta reduzida, com maior *market share* da White Martins Praxair Inc. com a linha *Stargold* e revendedores independentes na região Centro-Oeste.

Tamboli (1999) e Althouse (2013) sugerem que o *stick out* do eletrodo fique em torno de 10 a 15 vezes o valor de seu diâmetro. Foi utilizado, no entanto, o valor de 6 mm pelo melhor posicionamento do bocal da tocha na junta de ângulo. É provável que esse fator

tenha influenciado o comportamento do sinal de tensão e corrente de soldagem monitorado, porém não o suficiente para alterar o modo de transferência.

Em muitos casos houve falha na abertura do arco elétrico no início do processo, com duração de milissegundos, até que o processo se estabilizasse. Sabe-se que a abertura do arco a baixa tensão ocasiona tal falha, porém o evento foi detectado com tensões de 17 e 19 V. É provável que a queda de tensão no sistema tocha - metal base, e elementos de posicionamento e aterramento tenham contribuído para esse evento.

A fonte de soldagem TransPuls Synergic 5000 CMT permite a alteração online do valor de indutância, entre 0.0 e 10.0. Decidiu-se incluir a variação da indutância para avaliar o impacto dessa variável na estabilidade do processo de soldagem e qualidade do cordão de solda. A avaliação dos sinais obtidos do processo e via análise visual do aspecto do cordão de solda, decidiu-se utilizar indutância 2.0 nos experimentos. Não foi analisado, porém, a dimensão da influência da indutância no escorrimento da poça de fusão durante a formação do filete.

A literatura não é clara em relação ao posicionamento do bico de contato em relação ao bocal da tocha e sua influência no escoamento do gás de proteção em um perfil de junta tipo T. Realizaram-se experimentos de o bico de contato recuado e projetado 2 mm em relação ao bocal e obtiveram-se resultados visualmente idênticos, dados os mesmo parâmetros de soldagem. Como a literatura pontua, vagamente, a utilização de bico de contato recuado em relação ao bocal, principalmente para proteção em relação aos possíveis respingos do processo de soldagem, foi utilizada essa configuração nos experimentos.

Iniciaram-se os experimentos com inclinação de 45° para ângulo de trabalho da tocha e percebeu-se que o segundo e o terceiro traçado intermitente de solda resultavam em deformação do perfil do filete. Não foi considerado o gradiente de temperatura na junta ou no cordão durante o posicionamento da tocha. Posteriormente, decidiu-se utilizar valores de ângulos de trabalho relacionados às velocidades de soldagem. Para WS de 5 mm/s, ângulo de 46°, WS de 7 mm/s com ângulo de 43° e WS de 9 mm/s com ângulo de 40°. Dessa forma, obtiveram-se perfis mais simétricos que o posicionamento contínuo de 45°.

Timings (2008) e Weman (2003), que referenciam ângulo de deslocamento da tocha em seus experimentos, reiteram como que a escolha desses valores é empírica ao declararem ângulos distintos utilizados para soldagem em junta tipo T, o primeiro em  $-20^\circ$  ou segundo em  $-15^\circ$ . Não obstante, o valor de  $-15^\circ$  foi utilizado por auxiliar no aquecimento do metal base e alma a frente do arco elétrico, mesmo que Weman (2003), ao indicar a angulação, apresenta um perfil com penetração excessiva visto como adequado, como ilustra a Figura 2.14.

O robô IRB 2000 apresentou variação na velocidade de translação que simula a velocidade de soldagem. Embora tenham sido utilizadas entradas com valores médios de velocidades de soldagem para o cálculo das probabilidades condicionais e aplicação da regra de Bayes, a carência de calibração e ajustes amplia a incerteza sobre essa variável. Mesmo que fossem feitos reposicionamentos frequentes do robô para a posição inicial de repouso, no intuito de redefinir suas referências de posição retangulares e polares, a incerteza permanecia. Outros procedimentos de ajustes ao robô não foram realizados.

Os testes preliminares de soldagem em junta tipo T necessitaram de análise metalográfica do tipo macrografia, com ataque em solução ácida após polimento da superfície do perfil do filete, com o propósito de visualizar as dimensões de fusão e penetração da poça de fusão. Pelo grande número de experimentos, considerou-se, no entanto, a análise de perfis constituídos pelos parâmetros extremos, mínimo (17 V, 5 mm/s e 5 m/min) e máximo (23 V, 9 mm/s e 8 m/min), e dois valores aleatórios (17 V, 5 mm/s e 7 m/min; 21 V, 7 mm/s e 6 m/min) para a análise do perfil. Constatou-se que essas amostras possuíam perfis adequados, com boa fusão e penetração, para a continuidade dos experimentos (ver Apêndice D).

Ao final de cada cordão traçado foi constatada depressão característica atribuída à redução da alimentação do arame e contínua aplicação de esforços (como pressão do gás de proteção, força da gravidade e escorrimento da poça de fusão, entre outras). Para contornar essa anomalia na geometria do cordão de solda, deve-se, mesmo que se utilize inferência bayesiana para encontrar os melhores parâmetros de entrada para uma dada largura de cordão de solda, utilizar do tecimento para total preenchimento da lacuna formada.

Comparativos entre os resultados desse trabalho e de outras técnicas de sugestão de parâmetros para iniciar o processo de soldagem tornam-se complexas pela delimitação do universo por parte de cada autor. Carvalho (1997) apresenta uma série de valores de pernas para solda em filete em processo GMAW. Para que a comparação pudesse ser feita, foi calculada a largura do filete a partir dos valores medidos das pernas, assumindo geometria de filete como triângulo retângulo. No entanto, apenas os experimentos MC22, MC23, MC29 e MC33 possuem valores das variáveis indiretas tensão elétrica de soldagem, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação do arame que permitissem a utilização dos resultados desse trabalho.

No experimento MC22, por exemplo, o filete medido atinge 5,74 mm. Supondo que o projeto exigisse filete de 5 mm, para facilitar a comparação, as tabelas nos resultados desse trabalho indicam que, para tal largura de filete, a combinação de V17 (6,67%), WS8 (12,5%) e WFS6 (8,33%), valores próximos aos utilizados por Carvalho (1997), resulta em filete no valor do projeto. Porém, a combinação V19 (11,11%), WS9 (12,5%) e WFS6-7 (8,33% cada) implicariam em maior chance de se obter um filete de 5 mm de largura.

No experimento MC23, o filete medido atinge 7,72 mm. Supondo que o projeto exigisse filete de 7 mm, a combinação de V19 (33,33%), WS8 (25%) e WFS8 (33,33%), valores próximos aos utilizados por Carvalho (1997), resulta em filete no valor do projeto. Porém, a combinação V23 (41,67%), WS7 (43,75%) e WFS5 (40%) implicaria em maior chance de se obter um filete de 7 mm de largura.

No entanto, para os experimentos MC29 e MC35, nem todos os parâmetros estão dentro da faixa aqui encontrada que resulta em solda. No MC29, por exemplo, não há probabilidade aplicada para filetes de 5 mm para V21 e WFS8, apenas para WS8 (12,5%). No MC35, não há probabilidade aplicada para filetes de 5 mm para V21, apenas para WFS6 (8,33%) e WS8 (12,5%). É provável que, com maior amplitude de experimentos e base de dados, as tabelas de probabilidades entre W e V, WS e WFS ganhem mais áreas para apontar as relações entre valores desejados de largura do filete e variáveis indiretas do processo de soldagem, pois é evidente que nem todos os experimentos, como MC29 e MC35 mostram, podem ser abraçados pelas relações ali dispostas.

## **5 - CONCLUSÕES**

A aplicação da regra de Bayes permite associar IWP e DWP de forma direta, a partir de uma base de dados experimentais, o que reduz o número de avaliações empíricas para encontrar os parâmetros primários de soldagem em junta tipo T. Seu uso, no entanto, não substitui a amplitude da EPS e experiência do soldador para a escolha adequada dos parâmetros do processo de soldagem que atendam os requisitos de projeto.

O objetivo da utilização da regra de Bayes nesse trabalho foi, prioritariamente, servir como guia de parâmetros iniciais para se atingir determinado requisito de projetos de junta tipo T que vai de encontro à arbitrariedade por experiência do soldador, mesmo que necessite de conseguinte avaliação empírica de IWP, pré-testes previstos na AWS D1.1.

Os resultados apresentam uma distribuição de valores de parâmetros médios iniciais do processo de soldagem GMAW-S para um dado objetivo de largura de filete em junta tipo T, com relação direta aos esforços projetados para aquela junta. Não é possível apresentar as capacidades de filetes para um determinado valor de largura, já que a especificação do eletrodo influencia diretamente nessa avaliação. Um exemplo pontual de cálculo de capacidade pode ser encontrado no Apêndice A deste trabalho.

As técnicas de tecimento durante o traçado do cordão de solda não são plenamente substituídas pelas configurações adequadas de IDW para se atingir a maior largura de cordão de solda. Há limitação de largura de cordão para GMAW-S, como foi constatado nos experimentos, com obtenção de filetes de 5 a 10 mm de largura. Mesmo assim, para preencher a cavidade formada no final do cordão, é necessário fazer uso de técnicas de tecimento ou manter a tocha acesa ao chegar no ponto final do cordão e preencher a cavidade.

### **5.1 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Investigar a inclusão de outras variáveis IWP na análise da largura do filete em junta tipo T, ou juntas de ângulo agudas ou obtusas.

Investigar a aplicabilidade da mesma técnica em chapas de menor espessura, em alumínio, utilizando outros processos de soldagem.

Investigar uma metodologia de gestão de dados adquiridos em laboratório, com fichamentos e gestão de documentos técnicos, para a implantação de um acervo que contenha os sinais de tensão e corrente elétrica, e os valores de indutância, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame, configuração da tocha, e variados parâmetros diretos e indiretos do cordão de solda produzido.

Desenvolver uma aplicação virtual, aos moldes do VRTEX® da Lincoln Electric, que inclua as distribuições de probabilidade entre IWP e DWP, como a apresentada nesse trabalho, para acelerar o *setup* do processo de soldagem nas mãos de um soldador iniciante.

## REFERÊNCIAS

- ADOLFSSON, S.; BAHRAMI, A.; BOLMSJÖ, G.; CLAEISSON, I. (1999). Online quality monitoring in short-circuit gas metal arc welding. *Welding Journal*, no. 2, p. 59-73.
- ADOLFSSON, S.; ERICSON, K.; AGREN, B. (1995). On automatic detection of burnthrough in gma welding - weld voltage analysis. Research report TULEA 15. Division of Signal Processing, University of Technology. Luleå, Sweden.
- ALFARO, S. C. A.; CARVALHO, G. C.; DA CUNHA, F. R. (2006). A statistical approach for monitoring stochastic welding process. *Journal of Materials Processing Technology*, p. 4-14.
- ALTHOUSE, A. D.; TURNQUIST, C. H.; BOWDITCH, W. A.; BOWDITCH, K. E.; BOWDITCH, M. A.; (2013). *Modern welding*. 11th ed., Goodheart-Willcox Publisher.
- ANTUNES, S. S. (2003). Análise ergonômica do trabalho do soldador: contribuição para projeção ergonômica. Escola de Engenharia, PPGEP, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS.
- ASME (2013). *Welding, brazing, and fusing qualifications*. American Society of Mechanical Engineers. Boiler and Pressure Vessel Code, An International Code. Section IX, p. 184, Jul. New York, US.
- AWS A3.0 (2010). *Standard welding terms and definition*. 12th ed. American Welding Society. Florida, US.
- AWS D1.1 (2006). *Structural welding code - steel*. 20th ed. American Welding Society. Florida, US.
- AWS WHB (1984). *Welding handbook*. 7th ed., vol. 1-5. American Welding Society. Florida, US.
- BALASUBRAMANIAN, K. R.; BUVANASHEKARAN, G.; SANKARANARAYANASAMY, K. (2010). Modeling of laser beam welding of stainless steel sheet butt joint using neural networks. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 3, p. 80-84.
- BARRA, S. R. (2003). Influência do processo mig/mag térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC.
- BLODGETT, O. W. (1963). *Design of weldments*. The James F. Lincoln Arc Welding Foundation. Ohio, US.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. (2005). *Statistics for experimenters*. 2nd ed, John Wiley & Sons Publication. New Jersey, US.

- CARVALHO, G. C. (1997). An adaptative control system for offline programming in robotic gas metal arc welding. PhD thesis, CITECH. Cranfield University. England, UK.
- CHAWLA, K. S. e NORRISH, J. N. (1992). Quality monitoring of consumable manufacture using on-line pc based data acquisition and mathematical modelling techniques. Proceedings of Computer Technology in Welding. Cambridge, UK.
- CHUNG, K. Y. K.; AITKENT, R. J.; BRADLEY, D. R. (1997). Development and testing of a new sampler for welding fume. *Annals of Occupational Hygiene*. Vol. 41, no. 3, p. 355-372.
- COLACIOPPO, S. (1985). *Revista brasileira de saúde ocupacional*. Vol. 13, no. 49, p. 50-77.
- COOK, G. E. (1981). Feedback and adaptive control in automated arc welding systems. *Metal Construction*. Vol. 13, no. 9, p. 551-556.
- CORAINI, R.; KOBAYASHI, Y.; GONÇALVES, G. M. B. (2011). Influência do tipo de chanfro, tecimento, e sentido de laminação na distorção angular em soldagem gmaw-robotizada de alumínio. *Soldagem e Inspeção*. Vol. 16, no. 2, p. 123-136, abr/jun.
- DORNFELD, D. A.; TOMIZUKA, M.; LANGERI, G. (1982). Modeling and adaptive control of arc welding processes. *Measurement, Control in Batch Manufacturing*. ASME, D. E. Hardt, p. 53-64. New York, US.
- DREHER, M; FÜSSEL, U; SCHNICK, M. (2010). Simulation of shielding gas flow inside the torch and in the process region of gma welding. Technical University of Dresden, Germany.
- EBLE, R. G. JR.; STRINGER, J. B. (1995). ALARA benefits of an mpc robotic welding system. *High Level Radioactive Waste Management Proceedings of the Annual International Conference*. ASCE, p. 634-636. New York, US.
- FRAGA, F. E. N. (2009). Proposta de modelo para caracterizar susceptibilidade à distorção devido à soldagem em chapas de alumínio. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. Campinas/SP.
- FRANCO, L. D. N. (2007). Sincronização, captura e análise de imagens da poça de soldagem no processo gmaw convencional, no modo de transferência metálica por curto-circuito. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, publicação ENM.DM-17A/07. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília. Brasília/DF.
- GOLDMAN, C. F. (2002). Análise de acidentes de trabalho ocorridos na atividade metalúrgica e metal-mecânica no Estado do Rio Grande do Sul em 1996 e 1997 breve interligação sobre trabalho do soldador. Escola de Engenharia, PPGEP, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS.

- GREGORY, E. N.; ARMSTRONG, A. A. (2005). Welding symbols on drawing. Woodhead Publishing Ltd. Cambridge, UK.
- HECKERMAN, D. (1995). A tutorial on learning with bayesian networks. Microsoft Corporation, Advanced Technology Division. Washington, US.
- ISO 2553 (2013). Welding and allied processes. Symbolic representation on drawings of welded joints. International Organization for Standardization.
- JENSEN, F. V. (1996). Introduction to bayesian networks. Springer-Verlag. New York, US.
- KIM, J. W.; NA, S. J. (1995). A Study on the effect of contact tube-to-workpiece distance on weld pool shape in gas metal arc welding. *Welding Journal*, p. 141-152, May.
- KOIKE, C. M. C. C.; CARVALHO, G. C.; ALFARO, S. C. A.; BARROS, M. H. I. L. (1999). Monitoração da poça de fusão no processo de soldagem gmaw. Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica COBEM 99. Vol. único. Águas de Lindóia/SP.
- KOU, S. (2002). Welding metallurgy. 2nd ed. Wiley-Interscience. New Jersey, US.
- LEON-GARCIA, A. (1994). Probability and random processes for electrical engineering. 2nd ed. Addison-Wesley Publishing Company.
- LOPERA, J. E. P. (2010). Modelagem empírica da transferência goticular projetada em processos de soldagem GMAW baseada em técnicas de processamento de imagens digitais e superfícies de resposta. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-39A/10, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília. Brasília/DF.
- MACHADO, I. G. (2011). Dimensionamento de juntas soldadas de filete: uma revisão crítica. *Soldagem Inspeção*. Vol. 16, no. 2, p. 189-201, abr/jun. São Paulo/SP.
- MADEIRA, R. P.; MODENESI, P. J. (2010). Utilização do ensaio erichsen para a avaliação do desempenho de juntas soldadas. *Soldagem e Inspeção*. Vol. 15, no. 1, p. 22-30, jan/mar. São Paulo/SP.
- MARINE, F. (1994). Visual function of the welder a permanent preoccupation. *Welding in the world, Le Soudage Dans Le Monde*. Vol. 33, no. 2, p. 87-90.
- MELTON, G.B.; CHAWLA, K.S.; NORRISH, J. (1992). Analysis of tubular wire arc stability by computerized monitoring. *Proceedings of Computer Technology in Welding*. Cambridge, UK.
- MELTON, G.; SYKES, R. (2005). Electrical hazards power sources and installation. TWI: Technology Engineering. BS EN 60974-1.

- MILLER WELDS (2012). Guidelines for gas metal arc welding (gmaw). Disponível: [http://www.millerwelds.com/pdf/mig\\_handbook.pdf](http://www.millerwelds.com/pdf/mig_handbook.pdf). Acesso em: 06 de novembro de 2013.
- MILLER, D. K. (2006). Steel Design Guide 21 - Welded connections: a primer for engineers. American Institute of Steel Construction, Inc. US.
- MODENESI, P. J. (2008). Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG.
- NADZAM, J.; ARMAO, F.; BYALL, L.; KOTECKI, D.; MILLER, D. (1995). Gmaw welding guide. Lincoln Electric®.
- NAIDU, D. S.; OZCELIK, S.; MOORE, K. L. (2003). Modeling, sensing and control of gas metal arc welding. Elsevier Science. Oxford, UK.
- NEAL, R. M. (1995). Bayesian learning from neural networks. PhD thesis. University of Toronto. Department of Computer Science. Ontario, Canada.
- NORTON ABRASIVOS (2013). Disponível: <http://www.norton-abrasivos.com.br>. Acesso em: 06 de novembro de 2013.
- PARMAR, R. S. (1995). Welding processes and technology. Khana Publishers. Delhi, India.
- PINTO, D. P. (2011). Modelagem da forma geométrica de cordões de solda utilizando ajuste de curvas para simulação computacional. Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica. Belo Horizonte/MG.
- PIRES, I.; QUINTINO, L.; MIRANDA, R. M. (2012). Analysis of the influence of shielding gas mixtures on the gas metal arc welding metal transfer modes and fume formation rate. International Journal of Materials in Engineering Applications. Vol. 28, issue 5, p. 1623-1631.
- PONOMAREV, V.; SCOTTI, A.; NORRISH, J.; LUCAS, W. (2009). Metal transfer modes in mig/mag (gmaw) welding: Contributions to a New IIW Classification. 62nd Annual Assembly and International Conference of the International Institute of Welding. Singapore. v. CD, p. 1-15.
- QUIMBY, T. B. (2008). Basic design concepts. Disponível: [www.bgstructuralengineering.com/BGDesign/BGDesign05.htm](http://www.bgstructuralengineering.com/BGDesign/BGDesign05.htm). Acesso em: 28 de agosto de 2013.
- ROADKILL ENTERPRISES, LLC. Disponível: [www.roadkillcustoms.com/hot-rods-rat-rods/welding/Ch10.asp#axzz2dGiK0H5l](http://www.roadkillcustoms.com/hot-rods-rat-rods/welding/Ch10.asp#axzz2dGiK0H5l). Acesso em: 28 de agosto de 2013.
- SHINODA, T.; KANEDA, H.; TAKEUCHI, Y. (1992). An evaluation of short circuiting arc phenomena in gma welding, Welding & Metal Fabrication, p. 522-525.

- SHIWEI, Z.; JIANPING, H.; FUXIN, W.; FENG, X. (2011). Modeling and simulating of short-circuit transferring in gmaw. Shanghai University of Engineering Science. Shanghai, China.
- SIQUEIRA, T. A. (2009). Desenvolvimento de uma interface de controle móvel para utilização em células de soldagem mig/mag. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, publicação ENM.DM-28A/2009, Universidade de Brasília. Brasília/DF.
- TAGUCHI, G.; ELSAYED, E. A.; HSIANG, T. C. (1990). Engenharia da qualidade em sistemas de produção. McGraw-Hill, Brasil.
- TAMBOLI, Akbar R. (1999). Handbook of structural steel connection design and details. McGrall-Hill. Princeton. New Jersey, US.
- TELEDYNE DALSA. CCD vs. CMOS. Disponível em: [www.dalsa.com/corp/markets/CCD\\_vs\\_CMOS.aspx](http://www.dalsa.com/corp/markets/CCD_vs_CMOS.aspx). Acesso em 4 de setembro de 2012.
- THAM, G.; YAAKUB, M. Y.; ABAS, S. K.; MANURUNG, Y. H.; JALIL, B. A. (2012). Predicting the gmaw 3F t-fillet geometry and Its welding parameter. Procedia Engineering 41, p. 1794-1799. Shah Alam, Malasya.
- TIMINGS, Roger. (2008). Fabrication and welding engineering. Elsevier Ltd. Oxford, UK.
- THORNTON, M.; STARES, I. (1994). Analysis of particulate fume generation rates from gas metal arc welding. Welding Review International. Vol. 13, no. 4, p 363-365, Nov.
- TORNER, M.; ZETTERBERG, C. (1991). Workload and musculoskeletal problems: a comparison between welders and office clerks (with reference also to fisherman). ergonomics. Vol. 34, no. 9, p. 1179-1196.
- TRUCCO, E.; VERRI, A. (1998). Introductory techniques for 3-d computer vision. 1st ed. Prentice Hall.
- UNT, A.; LAPPALAINEN, E.; SALMINEN, A. (2013). Autogenous laser and hybrid laser arc welding of t-joint low alloy steel with fiber laser systems. Lasers in Manufacturing Conference 2013. Physics Procedia 41, p. 140-143.
- WEMAN, K. (2003). Welding processes handbook. Woodhead Publishing Ltd. Cambridge, UK.



As seções I, II e III devem ser cheçadas durante o projeto de junta T. Para as seções I e II, tem-se que  $f_{wuk} = f_{uk} = 410 \text{ N/mm}^2$ . Para a seção III, tem-se que  $f_{wuk} = \sqrt{f_{uk} \cdot f_{euk}} \Rightarrow f_{wuk} = \sqrt{410 \cdot 510} = 457 \text{ N/mm}^2$ . Apenas forças perpendiculares ( $F_\alpha$ ) ao filete estão atuando na junta.

**Para a seção I, tem-se:**

$\alpha = 90^\circ$  (ângulo entre força F e seção I);

d (altura da solda) = z (perna) = 8,5 mm;

$F_{\alpha-I}$  = capacidade da seção I.

$$F_{\alpha-I} = \frac{d \cdot l \cdot f_{wd}}{\sqrt{2 + \cos(2\alpha)}} = \frac{d \cdot l \cdot \varphi \cdot f_{wuk}}{1,2 \cdot \gamma_n \cdot \sqrt{2 + \cos(2\alpha)}} = \frac{8,5 \cdot 200 \cdot 0,9 \cdot 410}{1,2 \cdot 1,1 \cdot \sqrt{2 + \cos(180)}}$$

$F_{\alpha-I} = 475 \cdot 10^3 \text{ N}$  para cada solda, lado superior e inferior.

**Para seção II, tem-se:**

$\alpha = 0^\circ$  (ângulo entre força F e seção II);

d (altura da solda) = z (perna) = 8,5 mm;

$F_{\alpha-II}$  = capacidade da seção II.

$$F_{\alpha-II} = \frac{d \cdot l \cdot f_{wd}}{\sqrt{2 + \cos(2\alpha)}} = \frac{d \cdot l \cdot \varphi \cdot f_{wuk}}{1,2 \cdot \gamma_n \cdot \sqrt{2 + \cos(2\alpha)}} = \frac{8,5 \cdot 200 \cdot 0,9 \cdot 410}{1,2 \cdot 1,1 \cdot \sqrt{2 + \cos(0)}}$$

$F_{\alpha-II} = 274 \cdot 10^3 \text{ N}$  para cada solda, lado superior e inferior.

**Para seção III, tem-se:**

$\alpha = 45^\circ$  (ângulo entre força F e seção III);

d (altura da solda ou garganta) =  $\frac{z \text{ (perna)}}{\sqrt{2}} = 6 \text{ mm}$ ;

$F_{\alpha-III}$  = capacidade da seção III.

$$F_{\alpha-III} = \frac{d \cdot l \cdot f_{wd}}{\sqrt{2 + \cos(2\alpha)}} = \frac{d \cdot l \cdot \varphi \cdot f_{wuk}}{1,2 \cdot \gamma_n \cdot \sqrt{2 + \cos(2\alpha)}} = \frac{6 \cdot 200 \cdot 0,9 \cdot 457}{1,2 \cdot 1,1 \cdot \sqrt{2 + \cos(90)}}$$

$F_{\alpha-III} = 264 \cdot 10^3 \text{ N}$  para cada solda, lado superior e inferior.

Dessa forma, a capacidade da solda de filete duplo é de  $2x F_{\alpha-III}$  (valor crítico) =  $2x 264 \cdot 10^3 = 528 \text{ kN}$ . A capacidade de carga da chapa de aço é:

$F_{PL}$  = capacidade da chapa de metal.

$$F_{PL} = 10 \cdot 200 \cdot \frac{410}{1,2 \cdot 1,1} = 621 \text{ kN}$$

Capacidade do metal = 621 kN > Capacidade de junta = 528 kN.

Os cálculos indicam que a junta irá falhar antes do metal de 10 mm, comportamento não esperado para o projeto. O que pode ser feito para ampliar a capacidade da junta é aumentar a largura do filete, com multipasses ou tecimento, por exemplo, ou alterar as especificações do eletrodo. Como regra geral para filetes duplos, utiliza-se a perna do mesmo tamanho que a espessura do metal base, caso se queira capacidade equivalente ao metal base.

## APÊNDICE B

Programa IRB 2000 da ABB, em linguagem ARLA. O programa posiciona o robô no início da junta previamente posicionada, com ângulo de trabalho em 45° e de deslocamento negativo em 15°, e traça três cordões de solda com velocidades diferentes. O exemplo abaixo utiliza 5, 7 e 9 mm/s como velocidade de soldagem.

```
10 COMMENT T JOINT AT 3 WELD BEADS
20 V=100.0 MAX=1500.0
30 TCP 1
40 COMMENT COORDINATE ZERO
50 FRAME 0
60 COMMENT RESET WELD START
70 RESET OUTP 5
80 COMMENT POWER SCREEN ERROR RESET PULSE OUTP 6
90 SET OUTP 6
100 RESET OUTP 6 DELAY 0.01
110 COMMENT SELECT MANUAL MODE
120 LET R 1 = 3
130 TRANSFER R 1 TO PORT NO 1
140 ROBOT COORD
150 POS V=200.00% FINE X=1550.00 Y=161.00 Z=900.00 Q1=1.00 Q2=0.00
Q3=0.00 Q4=0.00
160 POS V=100.00% FINE X=1528.00 Y=120.00 Z=635.00 Q1=1.00 Q2=0.00
Q3=0.00 Q4=0.00
170 POS V=20.00% FINE X=1525.00 Y=120.00 Z=635.00 Q1=0.915976
Q2=0.379410 Q3=0.120590 Q4=0.049950
180 POS V=20.00% FINE X=1524.13 Y=174.88 Z=594.00 Q1=0.915976
Q2=0.379410 Q3=0.120590 Q4=0.049950
190 PULSE OUTP 6
200 WAIT UNTIL INP 5 = 1
210 SET OUTP 5
```

220 POS V=5.00% FINE X=1469.13 Y=174.88 Z=594.00 Q1=0.915976  
Q2=0.379410 Q3=0.120590 Q4=0.049950  
230 RESET OUTP 5  
240 POS V=10.00% FINE X=1464.13 Y=174.88 Z=594.00 Q1=0.915976  
Q2=0.379410 Q3=0.120590 Q4=0.049950  
250 SET OUTP 5  
260 POS V=7.00% FINE X=1409.13 Y=174.88 Z=594.00 Q1=0.915976  
Q2=0.379410 Q3=0.120590 Q4=0.049950  
270 RESET OUTP 5  
280 POS V=10.00% FINE X=1404.13 Y=174.88 Z=594.00 Q1=0.915976  
Q2=0.379410 Q3=0.120590 Q4=0.049950  
290 SET OUTP 5  
300 POS V=9.00% FINE X=1349.13 Y=174.88 Z=594.00 Q1=0.915976  
Q2=0.379410 Q3=0.120590 Q4=0.0499506  
310 RESET OUTP 5  
320 WAIT UNTIL INP 5 = 1  
330 COMMENT CALL IRB START POSITION  
340 CALL PROG 2000  
350 STOP

## APÊNDICE C

Memória de cálculo de probabilidades a posteriori utilizando Regra de Bayes.

Entradas e saídas:

|         |  |  |       |       |       |       |       |         |    |  |
|---------|--|--|-------|-------|-------|-------|-------|---------|----|--|
| Entrada |  |  |       |       |       |       |       |         |    |  |
|         | Tensão de soldagem (V)                   |  | 17    | 19    | 21    | 23    |       | V       |    |  |
|         | Velocidade de soldagem (WS)              |  | 5     | 7     | 9     |       |       | mm/s    |    |  |
|         | Velocidade de alimentação do arame (WFS) |  | 5     | 6     | 7     | 8     |       | m/min   |    |  |
| Saída   |  |  |       |       |       |       |       |         |    |  |
|         | Largura do cordão                        |  | 5-5,9 | 6-6,9 | 7-7,9 | 8-8,9 | 9-9,9 | 10-10,9 | mm |  |

Probabilidades individuais:

| Número de experimentos |         |  |    |            |        |
|------------------------|---------|--|----|------------|--------|
| V                      | 17      |  | 12 | P(V=17)    | 25,00% |
|                        | 19      |  | 12 | P(V=19)    | 25,00% |
|                        | 21      |  | 12 | P(V=21)    | 25,00% |
|                        | 23      |  | 12 | P(V=23)    | 25,00% |
| WS                     | 5       |  | 16 | P(WS=5)    | 33,33% |
|                        | 7       |  | 16 | P(WS=7)    | 33,33% |
|                        | 9       |  | 16 | P(WS=9)    | 33,33% |
| WFS                    | 5       |  | 12 | P(WFS=5)   | 25,00% |
|                        | 6       |  | 12 | P(WFS=6)   | 25,00% |
|                        | 7       |  | 12 | P(WFS=7)   | 25,00% |
|                        | 8       |  | 12 | P(WFS=8)   | 25,00% |
| W                      | 5-5,9   |  | 2  | P(W=5)     | 4,17%  |
|                        | 6-6,9   |  | 12 | P(W=6)     | 25,00% |
|                        | 7-7,9   |  | 15 | P(W=7)     | 31,25% |
|                        | 8-8,9   |  | 11 | P(W=8)     | 22,92% |
|                        | 9-9,9   |  | 3  | P(W=9)     | 6,25%  |
|                        | 10-10,9 |  | 2  | P(W=10)    | 4,17%  |
|                        | falha   |  | 3  | P(W=falha) | 6,25%  |

Probabilidades condicionais a priori:

|               |         |               |        |               |         |               |        |
|---------------|---------|---------------|--------|---------------|---------|---------------|--------|
| P(V=17 W=5)   | 50,00%  | P(V=19 W=5)   | 50,00% | P(V=21 W=5)   | 0,00%   | P(V=23 W=5)   | 0,00%  |
| P(V=17 W=6)   | 50,00%  | P(V=19 W=6)   | 25,00% | P(V=21 W=6)   | 33,33%  | P(V=23 W=6)   | 8,33%  |
| P(V=17 W=7)   | 26,67%  | P(V=19 W=7)   | 20,00% | P(V=21 W=7)   | 26,67%  | P(V=23 W=7)   | 33,33% |
| P(V=17 W=8)   | 18,18%  | P(V=19 W=8)   | 9,09%  | P(V=21 W=8)   | 27,27%  | P(V=23 W=8)   | 45,45% |
| P(V=17 W=9)   | 33,33%  | P(V=19 W=9)   | 0,00%  | P(V=21 W=9)   | 33,33%  | P(V=23 W=9)   | 33,33% |
| P(V=17 W=10)  | 50,00%  | P(V=19 W=10)  | 50,00% | P(V=21 W=10)  | 0,00%   | P(V=23 W=10)  | 0,00%  |
|               |         |               |        |               |         |               |        |
| P(WS=5 W=5)   | 0,00%   | P(WS=7 W=5)   | 0,00%  | P(WS=9 W=5)   | 100,00% |               |        |
| P(WS=5 W=6)   | 0,00%   | P(WS=7 W=6)   | 41,67% | P(WS=9 W=6)   | 75,00%  |               |        |
| P(WS=5 W=7)   | 33,33%  | P(WS=7 W=7)   | 46,67% | P(WS=9 W=7)   | 26,67%  |               |        |
| P(WS=5 W=8)   | 54,55%  | P(WS=7 W=8)   | 36,36% | P(WS=9 W=8)   | 9,09%   |               |        |
| P(WS=5 W=9)   | 100,00% | P(WS=7 W=9)   | 0,00%  | P(WS=9 W=9)   | 0,00%   |               |        |
| P(WS=5 W=10)  | 100,00% | P(WS=7 W=10)  | 0,00%  | P(WS=9 W=10)  | 0,00%   |               |        |
|               |         |               |        |               |         |               |        |
| P(WFS=5 W=5)  | 0,00%   | P(WFS=6 W=5)  | 50,00% | P(WFS=7 W=5)  | 50,00%  | P(WFS=8 W=5)  | 0,00%  |
| P(WFS=5 W=6)  | 50,00%  | P(WFS=6 W=6)  | 25,00% | P(WFS=7 W=6)  | 16,67%  | P(WFS=8 W=6)  | 25,00% |
| P(WFS=5 W=7)  | 40,00%  | P(WFS=6 W=7)  | 26,67% | P(WFS=7 W=7)  | 20,00%  | P(WFS=8 W=7)  | 20,00% |
| P(WFS=5 W=8)  | 18,18%  | P(WFS=6 W=8)  | 27,27% | P(WFS=7 W=8)  | 27,27%  | P(WFS=8 W=8)  | 27,27% |
| P(WFS=5 W=9)  | 33,33%  | P(WFS=6 W=9)  | 0,00%  | P(WFS=7 W=9)  | 66,67%  | P(WFS=8 W=9)  | 0,00%  |
| P(WFS=5 W=10) | 0,00%   | P(WFS=6 W=10) | 50,00% | P(WFS=7 W=10) | 50,00%  | P(WFS=8 W=10) | 0,00%  |

Probabilidades condicionais a posteriori:

|              |        |              |        |               |        |
|--------------|--------|--------------|--------|---------------|--------|
| P(W=5 V=17)  | 6,67%  | P(W=6 V=17)  | 40,00% | P(W=7 V=17)   | 26,67% |
| P(W=5 V=19)  | 11,11% | P(W=6 V=19)  | 33,33% | P(W=7 V=19)   | 33,33% |
| P(W=5 V=21)  | 0,00%  | P(W=6 V=21)  | 33,33% | P(W=7 V=21)   | 33,33% |
| P(W=5 V=23)  | 0,00%  | P(W=6 V=23)  | 8,33%  | P(W=7 V=23)   | 41,67% |
|              |        |              |        |               |        |
| P(W=5 WS=5)  | 0,00%  | P(W=6 WS=5)  | 0,00%  | P(W=7 WS=5)   | 31,25% |
| P(W=5 WS=7)  | 0,00%  | P(W=6 WS=7)  | 31,25% | P(W=7 WS=7)   | 43,75% |
| P(W=5 WS=9)  | 12,50% | P(W=6 WS=9)  | 56,25% | P(W=7 WS=9)   | 25,00% |
|              |        |              |        |               |        |
| P(W=5 WFS=5) | 0,00%  | P(W=6 WFS=5) | 40,00% | P(W=7 WFS=5)  | 40,00% |
| P(W=5 WFS=6) | 8,33%  | P(W=6 WFS=6) | 25,00% | P(W=7 WFS=6)  | 33,33% |
| P(W=5 WFS=7) | 8,33%  | P(W=6 WFS=7) | 16,67% | P(W=7 WFS=7)  | 25,00% |
| P(W=5 WFS=8) | 0,00%  | P(W=6 WFS=8) | 33,33% | P(W=7 WFS=8)  | 33,33% |
|              |        |              |        |               |        |
| P(W=8 V=17)  | 13,33% | P(W=9 V=17)  | 6,67%  | P(W=10 V=17)  | 6,67%  |
| P(W=8 V=19)  | 11,11% | P(W=9 V=19)  | 0,00%  | P(W=10 V=19)  | 11,11% |
| P(W=8 V=21)  | 25,00% | P(W=9 V=21)  | 8,33%  | P(W=10 V=21)  | 0,00%  |
| P(W=8 V=23)  | 41,67% | P(W=9 V=23)  | 8,33%  | P(W=10 V=23)  | 0,00%  |
|              |        |              |        |               |        |
| P(W=8 WS=5)  | 37,50% | P(W=9 WS=5)  | 18,75% | P(W=10 WS=5)  | 12,50% |
| P(W=8 WS=7)  | 25,00% | P(W=9 WS=7)  | 0,00%  | P(W=10 WS=7)  | 0,00%  |
| P(W=8 WS=9)  | 6,25%  | P(W=9 WS=9)  | 0,00%  | P(W=10 WS=9)  | 0,00%  |
|              |        |              |        |               |        |
| P(W=8 WFS=5) | 13,33% | P(W=9 WFS=5) | 6,67%  | P(W=10 WFS=5) | 0,00%  |
| P(W=8 WFS=6) | 25,00% | P(W=9 WFS=6) | 0,00%  | P(W=10 WFS=6) | 8,33%  |
| P(W=8 WFS=7) | 25,00% | P(W=9 WFS=7) | 16,67% | P(W=10 WFS=7) | 8,33%  |
| P(W=8 WFS=8) | 33,33% | P(W=9 WFS=8) | 0,00%  | P(W=10 WFS=8) | 0,00%  |

## APÊNDICE D

Exemplos registrados de macrografia efetuadas em seções de juntas tipo T.

