

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

Fernando Dias Vieira

**DESENVOLVIMENTO DE TOCHA E DE PROCEDIMENTO  
PARA A SOLDAGEM MIG/MAG EM CHANFRO ESTREITO  
DE PEÇAS ESPESSAS EM AÇO AO CARBONO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Carlos E. Niño, Dr Eng.

Florianópolis,  
2012



Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Vieira, Fernando Dias

Desenvolvimento de tocha e de procedimento para a soldagem MIG/MAG em chanfro estreito de peças espessas em aço ao carbono [dissertação] / Fernando Dias Vieira ; orientador, Carlos Enrique Niño - Florianópolis, SC, 2012. 105 p. ; 21cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Procedimento de soldagem em chanfro estreito. 3. Narrow gap. 4. Soldagem sem pré-aquecimento. 5. Tocha especial. I. Niño, Carlos Enrique . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.



Fernando Dias Vieira

**DESENVOLVIMENTO DE TOCHA E DE PROCEDIMENTO  
PARA A SOLDAGEM MIG/MAG EM CHANFRO ESTREITO  
DE PEÇAS ESPESSAS EM AÇO AO CARBONO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Florianópolis, 12 de junho de 2012.

---

Prof. Júlio César Passos, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Augusto José de Almeida Buschinelli, Dr. Ing.

---

Prof. Carlos Augusto Silva de Oliveira, Dr. Sc.

---

Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.



Dedico este trabalho à  
minha família, namorada e  
amigos, que são o meu  
alicerce.





## **AGRADECIMENTOS**

À minha família e minha namorada, que sempre me apoiaram em todas as minhas decisões, atitudes e necessidades, estando sempre ao meu lado, até quando existia alguma distância física entre nós.

À empresa WEG Equipamentos Elétricos e a todos que, de uma forma ou de outra, auxiliaram positivamente na realização dos trabalhos dentro da empresa, do departamento de Engenharia Industrial, dos outros departamentos e setores.

Ao meu orientador Prof. Carlos Enrique Niño Bohórquez que me auxiliou de forma positiva e constante no encaminhamento deste trabalho, disponibilizando seu tempo para transmitir informações e conselhos valiosos.

Sem jamais esquecer aqueles que fizeram parte da minha vida em maior ou menor grau, mas que foram de enorme importância, pois me deram forças para conseguir vencer cada dificuldade que aparecia.



## RESUMO

Os aços doces apresentam elevada soldabilidade. Entretanto, quando se soldam de topo componentes desses materiais com grandes espessuras, ao utilizar uma junta em “V” são elevados o tempo e custo de soldagem e as tensões residuais. Além disso, pode ser necessário utilizar pré-aquecimento, a fim de evitar a falta de fusão dos bordos e reduzir os gradientes térmicos que poderiam produzir tensões e, com isso, trincas na solda. Uma alternativa nesses casos é o uso da técnica de soldagem em chanfro estreito, que produz ganho em produtividade e qualidade associado ao menor volume de material depositado. Nesse contexto, o presente trabalho visou o desenvolvimento de uma tocha adequada para a soldagem de chapas grossas (acima de 50 mm) pelo processo MIG/MAG com preparação da junta em U com pequena abertura (10 mm), assim como a especificação de um procedimento de soldagem que nessas condições dispense o pré-aquecimento. A tocha de soldagem foi reprojeta para conseguir vencer as dificuldades encontradas para obter uma proteção gasosa eficaz. Para testar a tocha e desenvolver o procedimento de soldagem foram realizados ensaios em chanfro em U com vários modos de transferência metálica, a saber: curto-circuito, spray pulsado e spray pulsado com dupla pulsação (pulsado térmico). O exame visual e a análise macrográfica de seções transversais das soldas mostraram que a tocha desenvolvida atendeu as solicitações impostas e que somente com a transferência duplamente pulsada é possível evitar a porosidade e falta de fusão dos bordos. Mediante ensaios de tração e Charpy foi verificado que ao realizar a soldagem em chanfro estreito as soldas tinham resistência mecânica e resistência ao impacto satisfatórias, mesmo quando executadas sem pré-aquecimento.

**Palavras-chave:** Soldagem em chanfro estreito. Transferência com dupla pulsação. Soldagem sem pré-aquecimento.



## ABSTRACT

Mild steels are known to have high weldability. However, when thick components from these materials are butt welded with a V groove joint preparation the lead time, welding costs and residual stresses are increased. Furthermore, it may be necessary to use preheating in order to avoid lack of fusion of the edges and reduce thermal gradients that could produce residual stresses and, thus, cracks in the weld. An alternative for the above case can be the use of narrow gap welding, to improve the quality and productivity by depositing a lower volume of material. According to this context, the present work aimed at developing a suitable torch for welding thick plate (above 50 mm) by GMAW process using an U groove joint with a small gap (10 mm), as well as specifying a welding procedure that dispense preheating. The welding torch was redesigned in order to overcome the difficulties for an effective shielding gas protection. To test the torch and develop an welding procedure there were performed welded samples with U groove joint using various metal transfer modes like shot circuit, pulse spray, and double pulsing (thermal pulsing). Through visual examination and macrographical analysis of cross sections of welds it was possible to verify that the developed torch achieved the stringent demands imposed and that only with double pulsing, defects like porosity and lack of fusion can be prevented. Tensile and Charpy test of specimens transverse to the welds showed that mechanical strength and impact resistance obtained with narrow gap welding are satisfactory, even when performed without preheating.

**Keywords:** Narrow gap welding. GMAW with double pulsing. Welding without preheating.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Vistas em perspectiva de uma roda polar.....	6
Figura 2– Representação esquemática de uma roda polar.....	6
Figura 3 – Obtenção de disco de grande tamanho a partir de chapas soldadas.....	7
Figura 4 – Dimensões da junta de topo em “V”, tabela modificada [1]..	8
Figura 5 – Representação esquemática do processo MIG/MAG modificada [4]. .....	10
Figura 6– Representação esquemática do modo de transferência por curtos- circuitos,modificada [4] .....	11
Figura 7– Representação esquemática do processo da transferência globular,modificada [4].....	12
Figura 8– Representação esquemática do modo de transferência spray [2].....	13
Figura 9– Representação da corrente pulsada e suas variáveis. [5].....	14
Figura 11- Aparência característica de um cordão de solda obtido com dupla pulsação. ....	17
Figura 12– Soldagem em chanfro estreito utilizando dois eletrodos “tandem” [6].....	22
Figura 13– Soldagem em chanfro estreito com oscilação do bico de contato em forma de pêndulo [6] .....	23
Figura 14– Soldagem em chanfro estreito com bico de contato rotativo: a) com furo inclinado; b) com furo excêntrico [6] .....	23
Figura 15– Soldagem em chanfro estreito com arame previamente deformado plasticamente [6].....	24
Figura 16– Soldagem em chanfro estreito com arame trançado [6].....	24
Figura 17– Soldagem em chanfro estreito com técnica do tipo II: a) passe de raiz; b) passe de enchimento; c) passe de acabamento [13]....	25
Figura 18– Soldagem em chanfro pelo processo TIG com alimentador de arame externo, conforme apresentado no detalhe. Adaptado da [16]	27
Figura 19–Soldagem em chanfro estreito com Arco.....	28
Figura 20- Diferentes tipos de chanfro para soldagem em chanfro estreito [6] .....	29
Figura 21– Modelo de tocha N° 1.....	35
Figura 22– Solda em chanfro estreito apresentando poros e respingos. 36	
Figura 23–Cordões depositados sobre chapa, com vazão do gás de proteção variando de 5 a 20 l/min. ....	36
Figura 24– Tocha modelo número um com bico de contato fundido....	37
Figura 25– Tocha N° 2 com canais divergentes para o fornecimento do gás de proteção.....	39

Figura 26– Protótipo da tocha Nº 2 com conectores longos, finos (indicados pelas setas) e material isolante (evidenciado pela superfície brilhante).....	40
Figura 27– Diferenças no posicionamento dos canais de refrigeração entre os modelos Nº 1 e Nº 2.....	41
Figura 28- Máquina de corte portátil com a tocha acoplada .....	42
Figura 29- Bancada utilizada para os ensaios. ....	43
Figura 30- Micrografia do MB constituído de ferrita e perlita. ....	44
Figura 31 - Soldagem em chanfro estreito reto. No detalhe a tocha está presa pela deformação térmica durante a soldagem.....	46
Figura 32- Geometria da junta a soldar utilizada. ....	46
Figura 33- Soldagem da junta com 6° de abertura de chanfro. ....	47
Figura 34- Dimensões dos corpos de prova para micrografia, macrografia e dureza.....	50
Figura 35- Corpo de prova para ensaio de tração.....	51
Figura 36- Corpo de prova para ensaio de Charpy.....	51
Figura 37- Posição de retirada do corpo de prova para ensaio de Charpy, na região da face. ....	52
Figura 38- Posição de retirada do corpo de prova para ensaio de Charpy, na metade da espessura. ....	52
Figura 39- Posição de retirada do corpo de prova para ensaio de Charpy, na região da raiz. ....	53
Figura 40– Macrografia da seção transversal de uma solda realizada nas condições atuais, isto é, utilizando junta em V e o processo MIG/MAG com transferência por curtos-circuitos. ....	59
Figura 41- Regiões de levantamento dos perfis de dureza pelo método Vickers.....	60
Figura 42- Gráfico de microdureza do corpo de prova com chanfro em “V” .....	60
Figura 43- Representação da distância bico de contato-peça,modificado [4].....	62
Figura 44- Soldagem em chanfro estreito com a presença de respingos. ....	62
Figura 45 - Ensaio não destrutivo de ultrassom nas chapas de teste. ....	64
Figura 46– Macrografia transversal de uma solda executada em chanfro estreito pelo processo MIG/MAG com transferência por curtos-circuitos. Em destaque é mostrada uma região com poros. ....	64
Figura 47- Micrografia da seção transversal à solda, na qual se pode observar: inclusão de escória (A), falta de fusão nas margens (B) e porosidade (C).....	65



Figura 48- Macrografia transversal onde estão identificadas as regiões que foram avaliadas: último passe (A) e passe de raiz (B).....	66
Figura 49- Micrografia do último passe (região A), em que podem ser observados o MB, ZAC e MS. ....	66
Figura 51- Micrografia dos grãos recristalizados. ....	67
Figura 52- Micrografia do passe de raiz, na qual se pode ver uma região não recristalizada (em que permanecem os grãos colunares) e outra recristalizada. ....	68
Figura 54- Macrografia da solda realizada com corrente pulsada.....	70
Figura 56- Micrografia do metal de solda, em que se pode observar porosidade. ....	71
Figura 57- Macrografia da solda obtida com corrente pulsada, utilizando tensão de 27 V e velocidade do arame de 7,0 m/min. ....	72
Figura 58- Micrografia junto ao pé do último cordão depositado no modo pulsado. ....	73
Figura 59- Micrografia do último passe, com grãos colunares parcialmente recristalizados. ....	73
Figura 60- Micrografia dos grãos recristalizados no penúltimo passe. .	74
Figura 61- Gráfico de variação de frequência, onde I é a corrente, $V_a$ é a velocidade de alimentação do arame e t é tempo, fornecido por Kempfi. ....	76
Figura 63- Macrografia da solda obtida com dupla pulsação. Em destaque, a região da raiz onde havia defeito. ....	77
Figura 64- Micrografia da região da raiz, onde, pode-se observar falta de fusão da raiz (A) e um vazio (B). ....	78
Figura 65- Macrografia da seção transversal de solda obtida com dupla pulsação e maior aporte térmico.....	79
Figura 66- Perfil de dureza na solda realizada com dupla pulsação.....	80
Figura 67- Comparação dos perfis de dureza na região da face, nas soldas executadas em junta em “V” (método tradicional) e em chanfro estreito com dupla pulsação. ....	80
Figura 68- Comparação dos perfis de dureza na região da metade da espessura, nas soldas executadas em junta em “V” (método tradicional) e em chanfro estreito com dupla pulsação.....	81
Figura 69- Comparação dos perfis de dureza na região da raiz, nas soldas executadas em junta em “V” (método tradicional) e em chanfro estreito com dupla pulsação. ....	81
Figura 70- Micrografia da ZAC formada de perlita fina +ferrita. ....	82
Figura 71- Micrografia do MS com perlita alongada e ferrita. ....	82
Figura 72- Representação do esquema de corte do corpo de prova de tração superior e inferior. ....	83

Figura 73- Ensaio de tração dos CP's soldados por NG- GMAW duplo pulsado, limite de escoamento e resistência a tração. ....	84
Figura 74- Corpo de prova de tração, representando fratura e região soldada. ....	85
Figura 75- Resultados do ensaio Charpy, de amostras soldadas em chanfro estreito com dupla pulsação e pré-aquecimento. ....	86
Figura 76- Macrografia da seção transversal de solda no modo duplo pulsado sem pré-aquecimento.....	87
Figura 77- Macrografia da seção transversal de solda apresentando a localização dos planos de medição de dureza. ....	88
Figura 78- Gráfico de microdureza na soldagem NG-GMAW duplo pulsado sem pré-aquecimento.....	88
Figura 79- Comparação dos perfis de dureza na região da face, nas soldas executadas em chanfro estreito com dupla pulsação, com e sem pré-aquecimento.....	89
Figura 80- Comparação dos perfis de dureza na região da metade da espessura, nas soldas executadas em chanfro estreito com dupla pulsação, com e sem pré-aquecimento.....	90
Figura 81- Comparação dos perfis de dureza na região da raiz, nas soldas executadas em chanfro estreito com dupla pulsação com e sem pré-aquecimento.....	90
Figura 82 - Micrografia da ZAC formada de perlita fina +ferrita acicular .....	91
Figura 83 - Micrografia do MS com perlita alongada e ferrita acicular	92
Figura 84 - Gráfico comparativo entre os ensaios de tração com e sem pré-aquecimento, da resistência a tração .....	93
Figura 85 -Gráfico comparativo entre os ensaios de tração com e sem pré-aquecimento, do limite de escoamento.....	94
Figura 86-Gráfico comparativo entre os ensaios de charpy com e sem pré-aquecimento.....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química da chapa de aço utilizada nos ensaios e valores exigidos pela norma ASTM A36 (% em peso).....	56
Tabela 2- Valores recomendados para a temperatura de pré-aquecimento, em função do carbono equivalente [22] .....	57
Tabela 3- Propriedades à tração da solda, em dois locais da junta em V .....	59



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME	The American Society of Mechanical Engineers
ASTM	The American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
Ceq	Carbono equivalente
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
DBCP	Distância entre o bico de contato e a peça
Ft	Frequência térmica
Ib	Corrente de base
Im	Corrente média
Ip	Corrente de pulso
GMAW	Gas metal arc welding
GTAW	Gas tungsten arc welding
HV	Dureza Vickers
IIW	International Institute of Welding
MAG	Metal active gas
MB	Metal de base
MIG	Metal inert gas
MS	Metal de solda
NG	Narrow gap ( em português, chanfro estreito)
SAW	Submerged arc welding (em português, arco submerso)
tb	Tempo de base
Tp	Período de pulso térmico
tp	Tempo de pulso
TIG	Tungsten inert gas
US	Ultrassom
Va	Velocidade de alimentação de arame
ZAC	Zona afetada pelo calor
ZAC-GG	Zona afetada pelo calor de grãos grosseiros



## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	3
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	5
3.1 Características das Rodas Polares de Geradores Elétricos .....	5
3.2 Processo de Soldagem MIG/MAG .....	9
3.2.1 Modos de Transferência.....	10
3.2.2 Transferência Spray Pulsada.....	13
3.2.3 MIG/MAG Duplamente Pulsado .....	15
3.3 Técnica de Soldagem em Chanfro Estreito.....	17
3.3.1Técnicas de Soldagem em Chanfro Estreito .....	18
3.3.2 Processos utilizados para a Soldagem em Chanfro Estreito ...	19
3.3.2.1 Soldagem em chanfro estreito com o processo	
MIG/MAG.....	20
a)Técnicas de soldagem tipo I .....	21
b) Técnica de soldagem tipo II .....	24
3.3.2.2 Soldagem em chanfro estreito com o processo TIG.....	26
3.3.2.3 Soldagem em chanfro estreito com o processo Arco	
Submerso.....	27
3.3.3 Tipos de Chanfro Utilizados .....	28
3.3.4 Principais Problemas ao Soldar em Chanfro Estreito .....	30
4.MATERIAIS E MÉTODOS .....	33
4.1 Desenvolvimento da Tocha .....	33
4.1.1 Modelo de Tocha Nº 1 .....	34
4.1.2 Modelo de Tocha Nº 2 .....	38
4.2 Bancada de Ensaios .....	41
4.3 Metais de Base e Consumíveis .....	43
4.4 Definição das Condições de Soldagem.....	47
4.5 Ensaios Realizados nas Amostras Soldadas .....	49
5.RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	55
5.1 Características do Metal de Base.....	55
5.2 Soldagem em Junta com Chanfro em “V” .....	57
5.3 Soldagem em Chanfro Estreito com Tocha Especial.....	60

5.3.1 Soldagem em Chanfro Estreito com Transferência por Curto-Circuito.....	61
5.3.2 Soldagem em Chanfro Estreito com Transferência Spray Pulsada .....	68
5.3.3 Soldagem MIG/MAG com Duplo Pulso e Pré-Aquecimento.....	74
5.3.4 Soldagem MIG/MAG com Duplo Pulso sem Pré-Aquecimento.....	86
6.CONCLUSÕES .....	97
6.1 Em Relação à Tocha Especial para Soldagem MIG/MAG em Chanfro Estreito .....	97
6.2 Em Relação à Especificação do Procedimento de Soldagem em Chanfro Estreito .....	98
7.SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	101
REFERÊNCIAS.....	103
Anexo 1- Características e Propriedades das Placas Isolantes SISOANITE SR 328.51. ....	105



## 1. INTRODUÇÃO

Os aços ao carbono são muito utilizados como materiais estruturais, devido ao seu baixo custo, fácil conformabilidade e elevadas usinabilidade e soldabilidade. Quanto à soldabilidade, ela está associada à facilidade de realizar a soldagem através dos mais diversos processos (p.ex. por fusão a arco, eletroescória, laser, etc.), sem precisar de pré-aquecimento nem tratamento térmico posterior. Entretanto, quando se soldam peças de grande espessura nestes materiais, podem surgir dificuldades, como as que serão ilustradas através do exemplo da fabricação das rodas polares para geradores.

As rodas polares dos geradores síncronos são projetadas em aço carbono, como o ASTM A36, selecionados por seu baixo custo e suas características mecânicas de alta conformabilidade e soldabilidade. A fabricação deste componente é baseada na soldagem de chapas de grande espessura (maior que 75,0 mm) calandradas, normalmente realizada por processos a arco. Na fase de soldagem, em função das elevadas espessuras e da geometria do chanfro em V, é necessário realizar o pré-aquecimento do conjunto e despender considerável tempo de processamento para a deposição do metal de adição.

Devido às tensões residuais decorrentes do processo de soldagem é fundamental, antes das usinagens do diâmetro externo do anel magnético e interna do cubo, realizar um tratamento térmico de alívio de tensões, para garantir as tolerâncias e estabilidade dimensional do componente. Como o pré-aquecimento, responsável por reduzir a velocidade de resfriamento da solda e as tensões residuais, é realizado a uma temperatura menor que a necessária para o tratamento térmico de alívio de tensões, o aquecimento nos dois casos deve ser feito em separado, e isto gera atrasos na fabricação desses componentes. Além disso, devido às grandes dimensões das rodas polares, as etapas de pré-aquecimento e alívio de tensões podem ser impraticáveis, por não se dispor de um forno de tamanho suficiente.

Para a soldagem de peças de grande espessura uma alternativa é o uso da técnica de “chanfro estreito” (narrow gap, em inglês), que pode ser aplicada com vários processos, como o arco submerso, MIG/MAG e TIG. Dentre as vantagens está a de diminuir o volume de material a ser depositado e, conseqüentemente, o tempo gasto no processo. Entretanto, uma grande desvantagem é a indisponibilidade destes equipamentos no

mercado brasileiro e o alto custo de aquisição das soluções completas existentes.

Outra opção possível de ser utilizada seria o processo de eletroescória, que tem como vantagens os menores requisitos na preparação da junta e uma elevada taxa de deposição de material. Contudo, este processo tende a produzir uma zona afetada pelo calor (ZAC) com grão grosseiro, o qual exige um tratamento térmico posterior de normalização para refinar o grão e devolver ao material sua tenacidade.

Em peças de grande porte, um processo de soldagem com características que permitam eliminar a necessidade de pré-aquecimento, minimize os tempos de fabricação e garanta um produto final isento de defeitos, seria um processo com um tempo de processamento menor e de custo reduzido.

Face ao exposto, este trabalho visou o estudo da aplicabilidade do processo MIG/MAG à soldagem de peças espessas fabricadas em aço A36 utilizando a técnica de soldagem de chanfro estreito sem a necessidade de utilização de pré-aquecimento e a fabricação da tocha especial para esta aplicação, sendo abordados aspectos operacionais do processo, como sua estabilidade, robustez e capacidade de diminuir a incidência de descontinuidades, além de aspectos metalúrgicos, referentes à capacidade de evitar porosidade, fragilização e deterioro das propriedades mecânicas na região da solda.

## 2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral o de desenvolver a técnica de soldagem pelo processo MIG/MAG em chanfro estreito, de forma a garantir a repetitividade das características da solda obtida, compatível com o tipo de peça que será fabricada.

Como objetivos específicos, têm-se

- a. Projetar uma tocha adequada para a soldagem em espaços confinados e que garanta uma eficaz proteção gasosa.
- b. Especificar as condições de soldagem, incluindo os tipos de transferência metálica, que evitem ou diminuam a incidência de descontinuidades passíveis de ocorrer na soldagem em chanfro estreito, como a falta de fusão dos bordos.
- c. Especificar um procedimento de soldagem para chapas de aço doce, ASTM A36, com espessuras elevadas e utilizando a técnica de chanfro estreito, de forma a evitar o uso de pré-aquecimento.



### **3. REVISÃO DA LITERATURA**

Para um correto entendimento da sequência de experimentos e análises propostas neste trabalho, primeiramente serão apresentadas as características de uma roda polar, seus requisitos de projeto e forma construtiva, deixando claro quais são as etapas para sua fabricação e os locais onde se aplica a soldagem.

Em um segundo momento, será descrito o processo de soldagem a arco conhecido como MIG/MAG e, em particular, as suas aplicações nos modos convencional, pulsado e duplamente pulsado.

Finalmente, será abordada a técnica de soldagem em chanfro estreito (conhecida na língua inglesa como “narrow gap”), que traz vários benefícios técnicos e econômicos em função do baixo aporte térmico imposto à peça e da redução da deposição de material no componente a ser soldado.

#### **3.1 CARACTERÍSTICAS DAS RODAS POLARES DE GERADORES ELÉTRICOS**

Os geradores elétricos são máquinas que transformam a energia mecânica de uma fonte externa em energia elétrica, quando a sua parte móvel (rotor) gira em relação à parte fixa (estator). Basicamente existem três tipos de geradores: síncronos, assíncronos e de corrente contínua.

Nos geradores síncronos, que são de interesse neste trabalho, o movimento do campo elétrico girante do estator é constante e sincronizado com o movimento do campo elétrico do rotor, de forma que não há escorregamento entre os campos. O rotor é provido de pólos bobinados que são alimentados por uma corrente elétrica de corrente contínua, gerando um campo magnético no rotor, o qual, através da variação deste campo induz uma corrente no estator.

Os rotores podem ser de pólos lisos, aplicados para altas rotações, ou pólos salientes, para baixas rotações. Como nas aplicações de hidrogeradores a velocidade de rotação gerada na turbina é muito baixa, a utilização de máquinas síncronas com pólos salientes é o padrão.

Os pólos salientes são fixados diretamente no eixo, ou em um componente acoplado a este que é conhecido como roda polar. A roda polar pode ser composta por um conjunto de chapas empilhadas, ou pode ser fundida ou parcialmente calandrada. Neste último caso, a roda é composta por três elementos básicos: o cubo para encaixe do eixo, fabricado normalmente por forjamento; o disco que é obtido por oxicorte a partir de chapa plana e o anel magnético que é calandrado a partir de chapa retangular obtida por oxicorte. Na figura 1 há vista em perspectiva da roda polar e na figura 2 um esquema dos componentes acima citados.

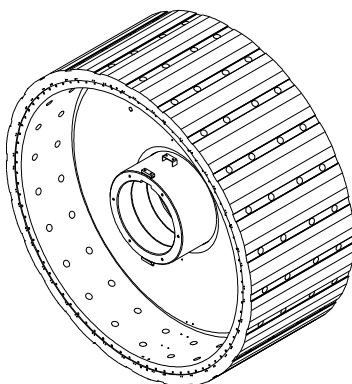


Figura 1– Vista em perspectiva de uma roda polar.

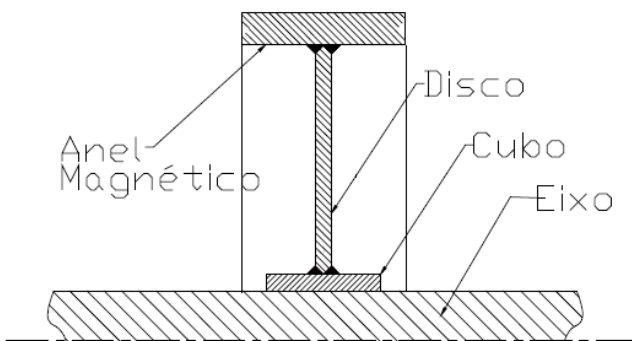


Figura 2– Seção longitudinal de uma roda polar.

Para o dimensionamento da roda polar são consideradas características elétricas do equipamento, como número de pólos e fluxo

magnético, e características mecânicas como resistência dos materiais e inércia requerida. Para atender este conjunto de fatores é necessário utilizar elementos com elevada espessura, o que torna importante procurar alternativas técnicas para redução dos custos de processamento destas grandes estruturas metálicas.

Nos casos em que o disco tem dimensões maiores do que aquelas das chapas planas (que são a matéria prima utilizada), uma alternativa possível é realizar a soldagem longitudinal das chapas, conforme é mostrado na figura 3 para uma tampa de fechamento, que é um caso similar. Assim, as rodas polares são fabricadas a partir de peças brutas de dimensões 2440 mm x 6000 mm com espessura maior que 50,8 mm, as quais são cortadas com maçarico, para depois serem unidas por soldagem a arco submerso (em inglês, SAW- submerged arc welding). Para a soldagem são utilizadas juntas, com as dimensões recomendadas na norma AWS D1.1 ( figura 4).



Figura 3 – Obtenção de disco de 4000 mm de diâmetros a partir de chapas soldadas.

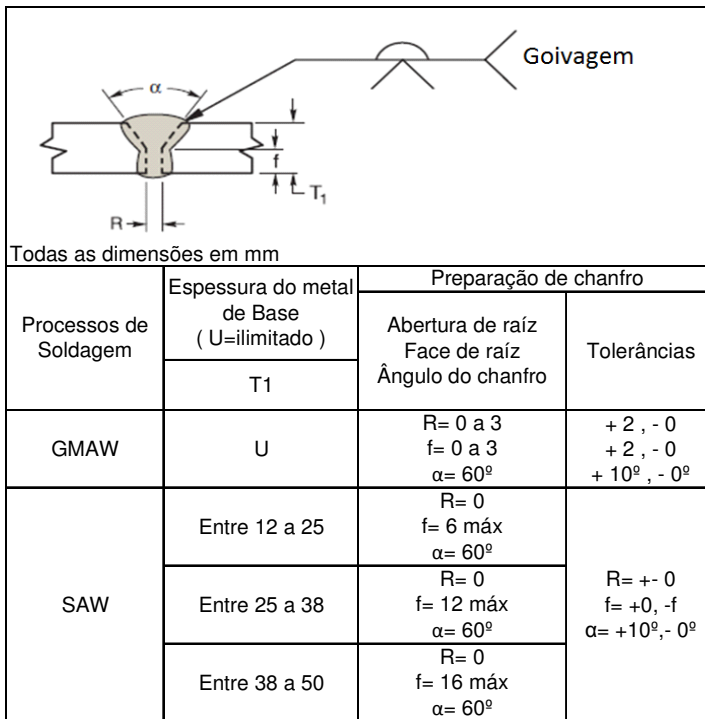


Figura 4 – Dimensões da junta de topo em “V” recomendadas na norma AWS D1.1 [1].

No caso do anel magnético, este passa por uma série de processamentos antes de ser montado com os demais componentes da roda polar. Inicialmente é realizado o oxicorte da chapa deixando em cada extremidade uma parte conhecida como “ponta reta”, para garantir que durante o processo de calandragem não fique nenhuma parte sem ser calandrada. A chapa cortada é submetida ao processo de calandragem, onde é executada sequencialmente a conformação das duas pontas, a elaboração de bisel nas pontas retas usando oxicorte manual e o acabamento posterior por esmerilhadeira, para obter nas bordas uma superfície livre de escória, óxidos e outras impurezas. Com as pontas conformadas no diâmetro final, o material é novamente colocado na calandra para o fechamento do anel magnético. Assim, este componente está pronto para realizar a sua união por soldagem.

A soldagem de união é realizada pelo processo arco submerso, utilizando eletrodo EM12K de 3,97 mm de diâmetro e fluxo com



especificação F6P2. O anel magnético antes da solda sofre um pré-aquecimento a 150 °C e durante a execução da soldagem é controlada a temperatura de interpasse. Após o fechamento de todo o chanfro com material de adição, na raiz do primeiro passe é feita a goivagem (remoção de material) do lado interno, para completar a solda desse lado utilizando também arco submerso. Com a soldagem concluída, esta é deixada resfriar por 48 horas com o intuito de dar oportunidade de que eventuais trincas a frio se desenvolvam, caso haja condições para isso, já com a peça a temperatura ambiente, é realizada a inspeção por ultrassom, utilizando como critérios para aceitação das soldas aqueles estipulados pelo código ASME Sec.VIII, especificamente a Divisão 1, apêndice 12.

Após liberado o anel magnético pelo setor de qualidade, este é montado juntamente com o disco e o cubo e os elementos são soldados pelo processo arco submerso. Terminada esta etapa, o conjunto é levado ao forno para que seja feito o alívio de tensões, após o qual é realizada a usinagem dos diâmetros internos e externos, assim como as furações para montagem dos pólos.

### **3.2 PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG**

O processo de soldagem MIG/MAG é um processo a arco voltaico, no qual é utilizado um gás de proteção externo e o arame do material de adição é fornecido em forma contínua. Este processo foi inicialmente concebido para a soldagem de alumínio utilizando uma atmosfera inerte (nesse caso é denominado de MIG), sendo posteriormente utilizado com gases ativos (i.e., misturas gasosas contendo oxigênio, neste caso é denominado de MAG). Tanto o MIG quanto o MAG são denominados pela AWS de GMAW (gas metal arc welding).

Durante a soldagem o arame-eletrodo é constantemente alimentado à região da solda, enquanto é fundido e depositado na peça (figura 5). Características importantes deste processo são sua elevada produção (massa de material depositado por unidade de tempo) e a facilidade de ser implementada sua aplicação automática, possibilitando a utilização de meios auxiliares (manipuladores, robôs, carros tracionados, etc.) para o deslocamento da tocha de soldagem, atendendo a aplicações em que são requeridas elevada produtividade e repetitividade.

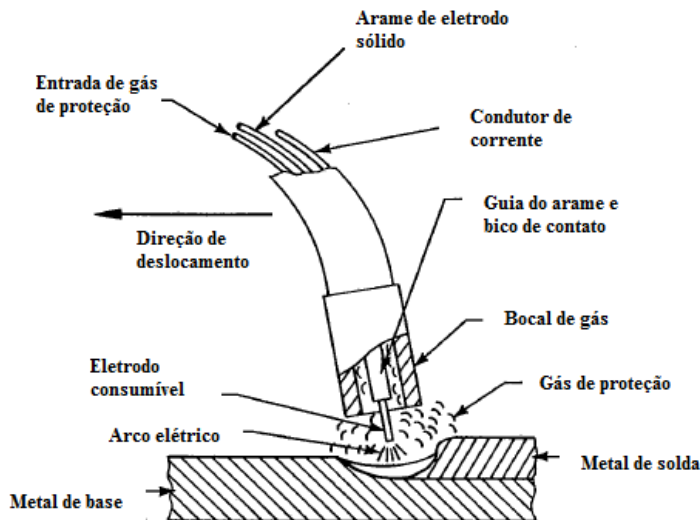


Figura 5 – Representação esquemática do processo MIG/MAG [2].

### 3.2.1 Modos de Transferência

Outra vantagem do processo MIG/MAG é que podem ser utilizados diferentes modos de transferência metálica, de forma que atendam melhor à aplicação específica. Os principais modos são o curto-circuito, o globular, o spray convencional e o spray pulsado.

O modo de transferência por curtos-circuitos ocorre com baixas correntes médias e baixas tensões de arco (e, portanto, com baixa potência do arco). Nele a transferência do metal fundido só acontece quando a ponta do eletrodo toca a peça. Nesse momento há uma elevação da corrente que produz o destacamento da gota por um fenômeno eletromagnético conhecido como efeito “pinch”, além do que a tensão superficial contribui para que a gota tenda a se incorporar à poça fundida [3]. A rigor, durante o curto-circuito o arco é extinto (i.e., deixa de existir), de modo que ele só é reaberto após o curto, quando a tensão atinge novamente um valor de arco. Na figura 6 é mostrado um esquema da sequência de eventos antes, durante e após os curtos-circuitos. Em função desse modo de transferência apresentar um baixo aporte térmico, ele é normalmente utilizado para a soldagem de chapas

finas, além de ser apto à soldagem em todas as posições, pois, por produzir uma poça fundida de pequeno tamanho, esta resfria rapidamente e tem menor tendência a escorrer [2].

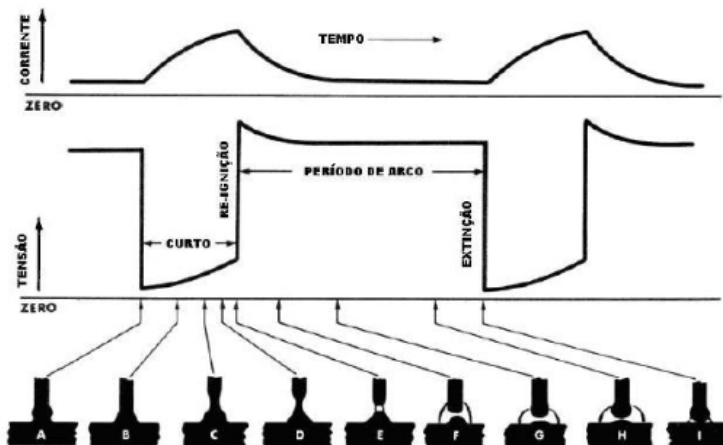


Figura 6– Representação esquemática do modo de transferência por curtos-circuitos, [2].

A transferência globular ocorre com baixas correntes, mas com tensões maiores que a transferência por curtos-circuitos e, por causa disso, o comprimento do arco é maior, de modo que a gota pode crescer muito antes de conseguir encostar-se à poça fundida. Finalmente, a gota se destaca do eletrodo devido ao seu próprio peso, que vence a força que a segura no eletrodo, devida à tensão superficial. Isso acontece quando a gota atinge um diâmetro muito maior que o do eletrodo. Como o deslocamento da gota destacada em direção à peça ocorre frequentemente devido à gravidade, podendo ocorrer curtos-circuitos aleatórios, este tipo de transferência só é possível na posição plana (figura 7).

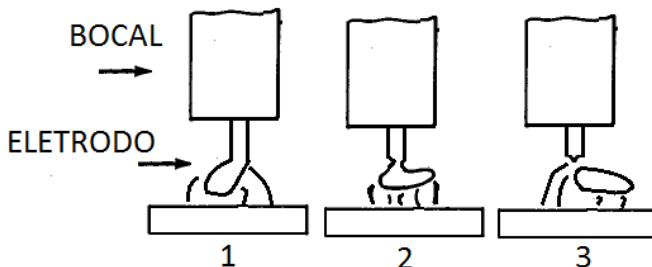


Figura 7– Representação esquemática do processo da transferência globular[2]

Outra característica desvantajosa deste tipo de transferência é a grande quantidade de respingos, devido ao destacamento das gotas e curtos-circuitos acontecerem de forma aleatória, possuindo elevada flutuação na corrente e tensão. Ocorre basicamente quando se utiliza o gás de proteção  $\text{CO}_2$  puro ou misturas de  $\text{CO}_2$  com Ar ou He (esta última mistura não é muito usual, devido, principalmente, ao seu maior custo).

O modo de transferência conhecido como spray (aqui chamado de spray convencional, para distingui-lo do spray pulsado) exige o uso de uma corrente alta, superior à denominada corrente de transição, a qual depende do diâmetro do eletrodo e de propriedades termo físicas do eletrodo (temperatura de fusão e tensão superficial). Além disso, para conseguir este modo de transferência a atmosfera protetora deve ser rica em argônio.

Esta transferência se caracteriza por ocorrer através do arco na forma de minúsculas gotas de metal que se destacam do eletrodo centenas de vezes por segundo (figura 8) e o cordão obtido é largo e de alta penetração. Como ocorre com elevadas correntes e, portanto, com elevadas potências do arco, a poça fundida é volumosa e isso impossibilita o uso deste modo de transferência fora da posição plana e na soldagem de chapas finas, pois nelas o arco produziria perfuração [2].

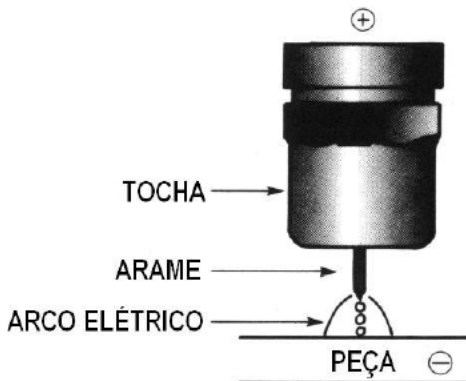


Figura 8– Representação esquemática do modo de transferência spray [4]

A transferência spray tem como vantagem uma grande estabilidade do arco, uma mínima quantidade de respingos e uma elevada produtividade. Além disso, pode ser utilizada para uma grande variedade de materiais e na soldagem de peças de grandes dimensões.

### 3.2.2 Transferência Spray Pulsada

Uma variação mais recente do modo de transferência spray convencional é a transferência por spray pulsado, a qual é conseguida com corrente pulsada, com valor da corrente média menor que a corrente de transição. Os parâmetros de pulsação (amplitudes de corrente de pulso e de base e seus respectivos tempos) devem ser selecionados de modo que se consiga o destacamento e transferência de uma única gota por cada pulso [3].

A grande vantagem deste modo de transferência é que possibilita uma transferência de metal em forma controlada e estável com uma corrente média ( $I_m$ ) abaixo da corrente de transição, o que o torna apta para a soldagem de todas as faixas de espessura, em todas as posições de soldagem.

Na figura 9 são mostrados os parâmetros da pulsação. A corrente de pulso  $I_p$  deve ser maior que a corrente de transição e o tempo de pulso  $t_p$  deve ser suficiente para formar uma gota, para que esta seja destacada e transferida no final do pulso. A corrente de base  $I_b$  tem

como função manter o arco aberto. O tempo de base  $t_b$  é definido em função da corrente média desejada,  $I_m$  (um maior valor de  $t_b$  resultará em menor valor de  $I_m$ ).

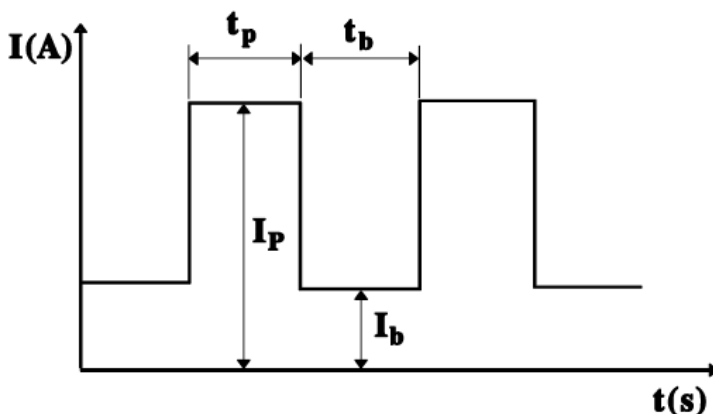


Figura 9– Representação da corrente pulsada e suas variáveis. [5]

Ao definir e controlar estes parâmetros do pulso é possível atingir duas condições importantes para a estabilidade do arco e da transferência metálica: que seja formada e destacada uma única gota em cada pulso de corrente e que o diâmetro das gotas formadas seja similar ao diâmetro do eletrodo.

Devido ao grande número de variáveis a definir ( $I_p$ ,  $I_b$ ,  $t_p$ ,  $t_b$ ) e à dificuldade de encontrar pessoal qualificado para executar uma correta definição desses parâmetros, a utilização deste modo de transferência é pouco atrativa para a grande maioria dos soldadores. Para compensar esta situação, muitos fabricantes de fontes de energia para soldagem têm incorporado nelas sistemas de controle denominados de “sinérgicos”, capazes de garantir que, quando o soldador defina alguns parâmetros de soldagem (tipo e diâmetro do eletrodo, tipo de gás de proteção e a corrente média desejada), sejam calculados os parâmetros da onda pulsada com base em valores previamente armazenados e algoritmos de controle que ajustam todas as demais variáveis dentro dos equipamentos de soldagem. [6]

Com a utilização do controle sinérgico nas fontes de energia, as aplicações do processo MIG/MAG têm sido ampliadas e possibilitadas. Assim, o maior custo destes equipamentos de soldagem é compensado com o aumento na operacionalidade do processo.

### 3.2.3 MIG/MAG Duplamente Pulsado

O modo de transferência MIG/MAG com dupla pulsação (também conhecido como transferência com pulsação térmica) tem como objetivo reunir as vantagens que se obtêm com a pulsação normal, em alta frequência (como foi explicado no item 3.2.2) com aquelas da pulsação em baixa frequência (em forma similar à aplicada ao processo TIG, denominada de “pulsação térmica”).

Neste caso, a pulsação térmica ou de baixa frequência refere-se à variação cíclica das correntes médias do número de pulsos de alta frequência em um período. Em cada período da pulsação térmica tem-se o pulso térmico e a base térmica (figura 10), e ao longo destes continua a existir uma pulsação de alta frequência em que são mantidos a corrente de pulso ( $I_p$ ) e o tempo de pulso ( $t_p$ ) de modo a conseguir a formação e destacamento de uma gota por pulso, enquanto que a variação da corrente de base ( $I_b$ ) e, principalmente, o tempo de base ( $t_b$ ), permite obter a corrente média desejada.

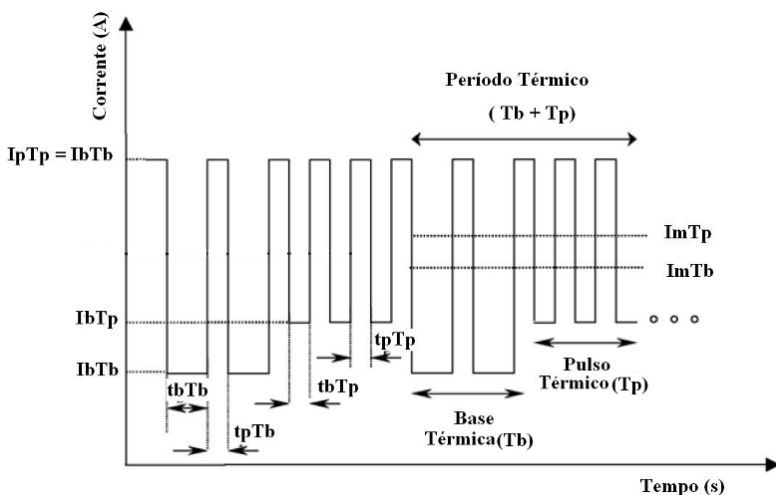


Figura 10- Representação esquemática da corrente duplamente pulsada e suas variáveis. [7]

Com o intuito de manter constante o comprimento de arco, a velocidade de alimentação do arame deve ser alterada de forma

sincronizada com as variações na corrente média. Assim sendo, durante o período de pulso térmico ( $T_p$ ) que possui uma corrente média elevada, a velocidade de alimentação do arame deve ser aumentada, de modo a compensar a maior taxa de fusão do eletrodo. Durante o período de base térmica ( $T_b$ ) a velocidade de alimentação deve ser reduzida.

A transferência com dupla pulsação tem as seguintes características [8-10]:

- Permite controlar o tamanho da poça fundida, de modo a ter uma geometria adequada do cordão de solda.
- Possibilita atingir condições de soldagem características de soldagem em curto-circuito, adequadas para a soldagem de chapas de pequena espessura com garantia da penetração.
- Tanto no pulso térmico quanto na base térmica, os parâmetros dos pulsos devem ser adequados para conseguir o controle da transferência metálica (formar e destacar uma gota em cada pulso, de forma similar ao modo pulsado convencional);
- A frequência térmica  $F_t$  (frequência de variação entre o pulso térmico e a base térmica) deve estar entre 0,5 e 10 Hz, para ter efeito sobre a poça fundida.
- Pode ser utilizado um curto tempo para o pulso térmico, para diminuir o tempo de exposição do material a temperaturas elevadas.
- Permitem reduzir o nível de defeitos como porosidades e mordeduras.

Entretanto, há alguns aspectos negativos:

- Formam-se pontos de concentração de tensão em decorrência da formação de escamas na superfície do cordão (figura 11), particularmente quando se usam baixos valores de  $F_t$ ;
- Nas fases de pulso térmico e base térmica os níveis de diluição são diferentes.



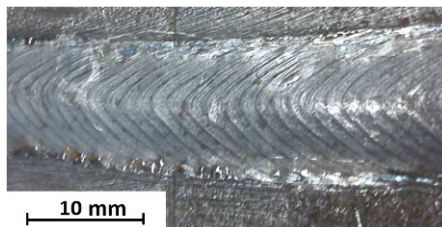


Figura 11- Aparência característica de um cordão de solda obtido com dupla pulsação.

### 3.3 TÉCNICA DE SOLDAGEM EM CHANFRO ESTREITO

Com a atual necessidade de aumentar a produtividade na união de componentes metálicos, muito tem sido trabalhado no desenvolvimento de novas formas de soldagem objetivando uma redução no tempo de fabricação. Uma delas é o aumento da taxa de fusão do eletrodo. Outra é utilizar uma geometria da junta que permita reduzir a quantidade de material que é necessário depositar para preenchê-la [11].

Na direção da segunda opção, os meios de produção atuais possuem certas limitações que impossibilitam uma redução acentuada do ângulo do chanfro, principalmente quando o objetivo principal é a soldagem de chapas de grandes espessuras, acima de 50 mm. Hoje em dia, as técnicas de soldagem em chanfro estreito permitem a união de chapas de até 300 mm de espessura utilizando uma junta de soldagem com chanfro reto ou, então, com chanfros em “V” com pequeno ângulo, menor do que  $10^\circ$  de preparação (para compensar a deformação angular que ocorre pela contração da solda e que poderia fechar à junta), não possuindo uma abertura, na parte mais estreita, maior que 12 mm [12].

A seguir serão apresentadas as principais variantes da técnica de chanfro estreito, os tipos de chanfros utilizados e os principais problemas que podem ocorrer.

### 3.3.1 Técnicas de Soldagem em Chanfro Estreito

As técnicas de soldagem em chanfro estreito recebem em inglês diferentes denominações “narrow gap welding”, “narrow groove welding” e “deep groove welding” [12-14]. Por outro lado, na escassa literatura existente em português a denominação é padrão. Denomina-se sempre soldagem em chanfro estreito [15].

A soldagem em chanfro estreito foi inicialmente desenvolvida com o objetivo de aumentar a produtividade na soldagem de topo de chapas grossas, através da diminuição da quantidade de material que seria necessário depositar no chanfro. Ela foi desenvolvida na União Soviética, Estados Unidos e Japão nos anos de 1957, 1960 e 1966, respectivamente, e no Japão era a mais utilizada na década de 80 [13, 14].

A soldagem em chanfro estreito não é um processo e sim uma técnica que pode ser utilizada com vários processos de soldagem a arco, como o MIG/MAG, arco submerso ou TIG. Para se referir à aplicação desta técnica com diversos processos, a Associação Americana de Soldagem (AWS- American Welding Society), definiu a seguinte nomenclatura:

- NG-GMAW (Narrow Gap Gas Metal Arc Welding), para a soldagem MIG/MAG em chanfro estreito.
- NG-SAW (Narrow Gap Submerged Arc Welding), para a soldagem a arco submerso em chanfro estreito.
- NG-GTAW (Narrow Gap Gas Tungsten Arc Welding), para a soldagem TIG em chanfro estreito.

Esta técnica é utilizada na soldagem de chapas de grandes espessuras e peças de grande porte e responsabilidade, tais como reatores nucleares, eixos de rotores, vasos de pressão, entre outras. Pode ser utilizada para soldas longitudinais ou circunferenciais. Para atender aos deslocamentos da tocha dentro do espaço reduzido existente dentro do chanfro reto (folga usual entre 9 e 12 mm), o sistema de deslocamento deve possuir tal grau de automatização que possibilite à

tocha não tocar nas laterais do chanfro, evitando assim aberturas de arco e defeitos de soldagem [12].

Como é aplicada à união de peças espessas, a soldagem é realizada em múltiplos passes. Normalmente são suficientes 1 ou 2 passes por camada, mas, quando a abertura do chanfro é maior, podem ser necessários 3 passes. Como os bordos da junta podem ser retos (e, portanto, paralelos) ou terem um pequeno ângulo entre si, a quantidade de passes por camada é constante durante toda a soldagem.

Em alguns casos, para compensar a deformação produzida pela contração da solda é recomendável utilizar preparações de junta em “V” ou “U”, de forma que a abertura existente para os bordos não diminua ao ponto de impossibilitar o deslocamento da tocha. Entretanto, nos casos onde esta preparação é realizada, esta deve ser menor que  $10^\circ$ , para manter as características vantajosas desta técnica.

Nesta técnica se utiliza um baixo aporte térmico na deposição de cada passe, o que possibilita a sua utilização em todas as posições de soldagem. As características e vantagens mencionadas até aqui não se aplicam a outros processos de soldagem como eletro-escória, eletro-gás e laser, que podem ser utilizados para unir peças com chanfro estreito, mas que, em função das peculiaridades de cada uma das fontes de calor utilizadas, não apresentam um baixo aporte térmico, nem a possibilidade de soldar em todas as posições.

Procurando obter uma definição padrão para esta técnica, que inclua suas principais particularidades, Malin [13,14] afirma:

“Soldagem em chanfro estreito é uma técnica de deposição de cordões propriamente orientada, associada com um processo de soldagem a arco, que é caracterizada por um número constante de cordões por camadas que são depositados um em cima do outro, em um chanfro estreito, reto e profundo”

### **3.3.2 Processos utilizados para a Soldagem em Chanfro Estreito**

Para se escolher o tipo de processo mais adequado para a aplicação desta técnica, devem-se conhecer as restrições do aporte térmico do material a ser soldado, qual geometria de junta se pode utilizar, quais as

posições de soldagem e as dificuldades existentes para a alimentação do arame-eletrodo e gás de proteção ou fluxo. A disponibilidade de equipamentos adequados para a realização da soldagem também acaba sendo um fator importante, visto o elevado custo de aquisição dos complexos equipamentos destinados especificamente à soldagem em chanfro estreito.

Normalmente são utilizados 3 tipos de processos com a técnica de soldagem em chanfro estreito: MIG/MAG, arco submerso e TIG. Não tão comum é a utilização do arame tubular, pouco citado na literatura. De todos os processos, o mais utilizado é o MIG/MAG e por isso será apresentado em primeiro lugar, e de uma forma mais detalhada.

### **3.3.2.1 Soldagem em chanfro estreito com o processo**

#### **MIG/MAG**

O processo MIG/MAG é um dos mais utilizados com a técnica de soldagem em chanfro estreito, pelas seguintes razões [12-14]:

- É relativamente fácil a visualização do material sendo depositado durante a soldagem, diferentemente do que ocorre com o processo arco submerso.

- Permite uma alta taxa de deposição de material, muito maior que a possível com o processo TIG.

- Pode ser utilizado com tochas de diversas geometrias, o que favorece sua utilização dentro de chanfros estreitos.

Ao aplicar o processo MIG/MAG na soldagem em chanfro estreito, a dificuldade principal encontrada é conseguir que o arame-eletrodo e o gás de proteção cheguem às regiões mais profundas do chanfro, de forma a garantir uma correta alimentação do material a ser depositado, sem problemas de proteção gasosa. Além disso, é necessário conseguir uma adequada penetração da poça fundida, tanto no fundo do canal de soldagem como nas margens laterais do chanfro.

Com o intuito de garantir a penetração na raiz e a fusão das margens do chanfro, diferentes técnicas de alimentação de eletrodo e gás de proteção têm sido desenvolvidas. Essas técnicas podem ser divididas em dois grupos: aquelas em que o bico de contato é inserido dentro do

chanfro (tipo I) e aquelas em que o bico de contato fica acima da superfície da chapa a ser soldada (tipo II).

As técnicas do tipo I permitem atingir maiores taxas de deposição, mas requerem o uso de tochas especiais, projetadas especificamente para essa aplicação. Para a técnica do tipo II, como o bico de contato fica acima da superfície da peça, podem-se utilizar tochas de soldagem normal, sem maiores alterações, mas como o comprimento do eletrodo é grande (particularmente quando se está executando os primeiros passes, junto à raiz), devem ser utilizados eletrodos de maior diâmetro, para que tenham rigidez. Contudo, para facilitar o deslocamento deste arame de maior diâmetro é necessário que o chanfro tenha uma maior abertura e isso resulta na necessidade de depositar maiores volumes de material para preencher a junta, de modo que as técnicas do tipo II não conseguem atingir a mesma produtividade daquelas do tipo I.

#### *a) Técnicas de soldagem tipo I*

Nas técnicas de soldagem do tipo I, a tocha é responsável pela alimentação do eletrodo e do gás de proteção, enquanto se move livremente dentro do chanfro. Um projeto de tocha para atender estas necessidades é complexo, devido às pequenas distâncias entre as laterais do chanfro, pois não se deve permitir que a tocha entre em contato com as superfícies do chanfro, para evitar aberturas de arco inesperadas, que danificariam a superfície dos bordos ou, até mesmo, o próprio equipamento.

A alimentação de gás de proteção é um aspecto crítico, devido à necessidade de gerar uma perfeita proteção das regiões aquecidas, para ter uma solda isenta de defeitos, o que implica evitar a entrada de ar, mesmo nos pontos mais profundos e estreitos do chanfro. Em função das dificuldades existentes para se realizar uma apropriada proteção gasosa em uma região estreita, algumas vezes a tocha possui dois canais de passagem de gás de proteção, um antes do eletrodo e outro depois [12].

Estando a tocha dentro de uma região onde há grande geração de calor, meios de refrigeração são muito importantes para evitar o superaquecimento e, até, a fusão dos componentes móveis. Como fluido de refrigeração é utilizado normalmente água, mas, quando se trabalha com menores potências, pode ser utilizado o próprio gás de proteção como meio de remoção de calor. Ao evitar o aquecimento e fusão de

componentes, é possível realizar a substituição dos elementos consumíveis (i.e., aqueles que sofrem desgaste) somente quando da manutenção da tocha.

Estando o conjunto de soldagem dentro do chanfro estreito, para evitar a falta de penetração da solda nas laterais do chanfro, que é uma falha de soldagem recorrente na utilização desta técnica, normalmente são utilizados mecanismos que garantam que o eletrodo se direcione para suas paredes, tais como bicos de contato dobrados e direcionados para as paredes, bicos de contatos móveis (oscilantes ou giratórios), pré-deformação dos arames ou dois ou mais arames enrolados em forma de espiral, conforme é apresentado a seguir.

Na figura 12 é ilustrada uma técnica de soldagem utilizando dois arames em “tandem” (isto é, um na frente do outro), onde em cada bico de contato o arame é direcionado para um dos bordos, de forma a garantir a fusão dos dois bordos. Esta técnica exige a utilização de mais de uma fonte de soldagem, o que aumenta consideravelmente os custos do equipamento.

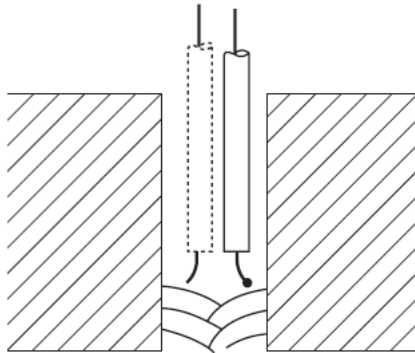


Figura 12– Soldagem em chanfro estreito utilizando dois eletrodos “tandem” [6]

Como uma forma de fazer com que o arco incida nos dois bordos do chanfro, pode-se utilizar a oscilação pendular do bico de contato (figura 13) por meio mecânico, embora isso seja dificultado pelo reduzido espaço existente dentro do chanfro. Como uma variação deste mecanismo, pode ser utilizado um bico de contato girante, com seu furo excêntrico ou inclinado, de modo a direcionar o eletrodo alternadamente para os dois bordos (figura 14). Contudo, esta técnica apresenta maior complexidade, visto a necessidade de fabricação de mecanismos de giro.

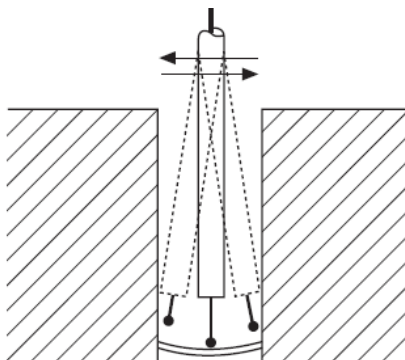


Figura 13– Soldagem em chanfro estreito com oscilação do bico de contato em forma de pêndulo [6]

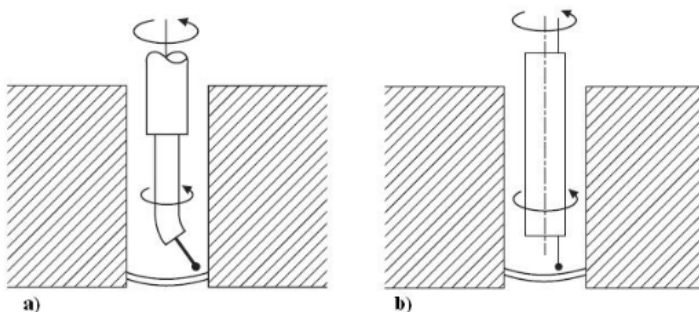


Figura 14– Soldagem em chanfro estreito com bico de contato rotativo: a) com furo inclinado; b) com furo excêntrico [6]

Outras possibilidades para direcionar os eletrodos para as laterais dos chanfros são as seguintes: i) utilizando dispositivos mecânicos capazes de deformar plasticamente o eletrodo antes de este entrar no bico de contato, visando promover a sua oscilação na saída do bico, conforme mostrado na figura 15; ii) utilizar eletrodos especiais (muito mais caros), formados por dois arames trançados entre si, fazendo que ao serem fundidos durante o processo de soldagem este façam um movimento rotacional, direcionando o arco para todas as margens da solda, conforme a figura 16.

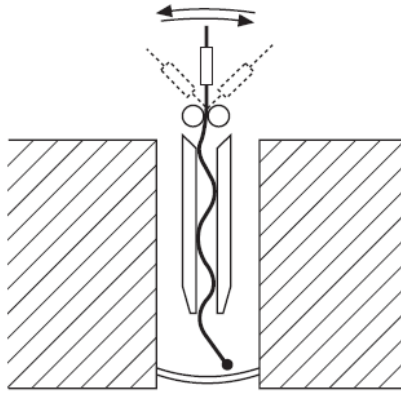


Figura 15– Soldagem em chanfro estreito com arame previamente deformado plasticamente [6]

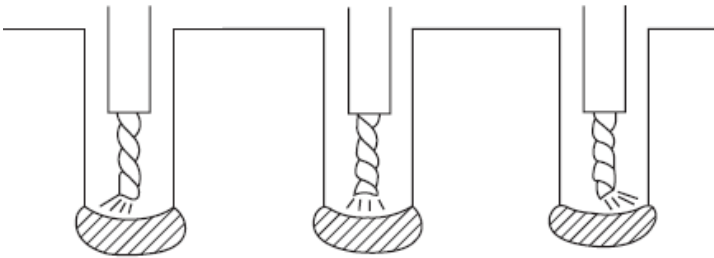


Figura 16– Soldagem em chanfro estreito com arame trançado [6]

### ***b) Técnica de soldagem tipo II***

Nas técnicas do tipo II o bico de contato fica acima da superfície de soldagem e a distância entre o bico de contato e a peça (DBCP) vai reduzindo após cada passe de soldagem, conforme mostra a figura 17. Diferentemente das técnicas do tipo I, estas técnicas dispensam o uso de dispositivos especiais, mas requerem utilizar eletrodos de maior diâmetro, para terem maior rigidez mecânica e uma menor resistência elétrica. [12,13]



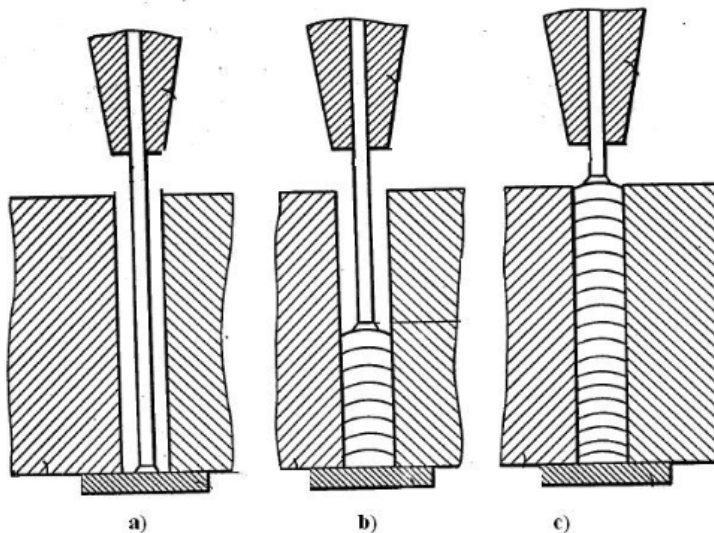


Figura 17– Soldagem em chanfro estreito com técnica do tipo II: a) passe de raiz; b) passe de enchimento; c) passe de acabamento [16]

A utilização de diâmetros de eletrodo superiores aos utilizados na técnica tipo I exige maiores aberturas do chanfro, até de 16 mm [17], o que possibilita a utilização de bocais normais para realizar a proteção gasosa da região a ser soldada. Como o bico de contato e os bocais dos gases de proteção não ficam dentro do chanfro, não existe o risco destes tocarem as paredes do chanfro e não são necessários tantos cuidados para o deslocamento do conjunto.

Na técnica tipo II são utilizados maiores aportes térmicos de soldagem. Por causa disso, aumenta a taxa de deposição de material e não é possível utilizar a técnica em posições fora da plana, devido ao tamanho maior da poça fundida, que poderia escorrer [13]. Apesar da alta taxa de deposição de material, esta técnica não garante uma maior produtividade em relação a técnicas do tipo I, visto que em contrapartida, o volume do chanfro a ser preenchido com a técnica tipo II é maior do que com a técnica tipo I.

Como uma consequência da aplicação de maiores valores da DBCP e de maiores comprimentos de arame-eletrodo, o aquecimento deste por efeito Joule faz com que perca rigidez a medida que o seu comprimento se torna maior. Isso acaba comprometendo o correto posicionamento do eletrodo dentro do chanfro, ocasionando a instabilidade do arco e o

deslocamento interno do eletrodo dentro do chanfro incorreto. Portanto, esse é um fator limitador da espessura que pode ser soldada com a técnica tipo II [17].

À medida que a DBCP vai sendo reduzida após cada passe de soldagem, para garantir que a redução do efeito Joule sobre o arame seja compensada de forma a permitir manter uma velocidade de deslocamento constante, deve ser feita a regulação dos parâmetros de soldagem de forma a: evitar valores de tensão do arco e corrente muito baixos, que diminuiriam a taxa de deposição. [16]

### **3.3.2.2 Soldagem em chanfro estreito com o processo TIG**

A soldagem em chanfro estreito pelo processo TIG apresenta grande uniformidade na qualidade do material depositado e possibilita a sua aplicação, quando necessário, com baixos aportes térmicos. É muito utilizada para a soldagem de peças de aço inoxidável em todas as posições.

Assim como, com o processo MIG/MAG, no processo TIG pode ser utilizada a técnica tipo I. Neste caso a ponta da pinça porta-eletrodo fica inserida dentro do chanfro, com o eletrodo não consumível posicionado de forma a garantir a fusão dos dois bordos do chanfro. Em muitos casos, graças a dispositivos especiais utilizados na tocha, o eletrodo pode possuir movimentos oscilatórios entre um bordo e o outro.

Normalmente o arame do metal de adição é alimentado de forma externa à tocha com um cabeçote motorizado (figura 18). Pode ser utilizado uma fonte auxiliar para realizar um pré-aquecimento do arame, visando um aumento da taxa de deposição.

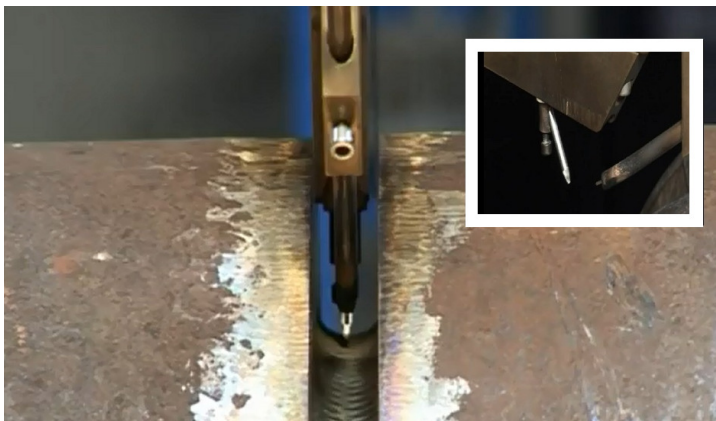


Figura 18– Soldagem em chanfro pelo processo TIG com alimentador de arame externo. No detalhe do quadro são mostradas as posições do eletrodo e do alimentador. Adaptada de [19]

As principais características com a utilização do processo TIG são a redução da contração longitudinal e transversal, um arco elétrico estável (visto que este é estabelecido com um eletrodo não consumível, minimizando os problemas derivados da alteração da DBCP), quantidade mínima de respingos e excelente acabamento do cordão depositado [20].

### **3.3.2.3 Soldagem em chanfro estreito com o processo Arco Submerso**

A aplicação do processo arco submerso para a soldagem em chanfro estreito apresenta grande interesse devido às altas taxas de deposição, não apresentar respingos e por produzir uma solda de alta qualidade [11].

O processo arco submerso é escolhido para soldagens de grande responsabilidade, mas somente na posição plana (esta é uma limitação do processo). Podem ser utilizados bordos retos e paralelos, ou com um pequeno ângulo, para compensar a deformação. Normalmente são realizados dois passes por camada, para que se possa utilizar uma variedade maior de dimensões de chanfro, reduzir o risco de inclusões de escórias, defeitos nos bordos e facilitar a retirada do fluxo.

Para aumentar a produtividade conseguida com este processo, muitas vezes são utilizados vários arames (figura 19). Como para a soldagem em chanfro estreito é necessário um cabeçote especial, na concepção deste, devem-se avaliar todas as possibilidades de utilizar dois ou mais eletrodos, não deixando de analisar qual material será soldado para não se aplicar um aporte térmico de soldagem maior do que o material possa suportar.



Figura 19–Soldagem em chanfro estreito com Arco

### 3.3.3 Tipos de Chanfro Utilizados

Para uma correta aplicação das técnicas de soldagem em chanfro estreito é muito importante a utilização de uma geometria do chanfro adequada, condizente com o processo e equipamentos disponíveis. Do contrário, pode ser inviável a aplicação da técnica. Embora na literatura existente seja dada importância ao dimensionamento do chanfro, as opiniões em relação às características geométricas são divergentes ou passíveis de má interpretação [6,12 e 17]. O dimensionamento do chanfro utilizado neste trabalho foi baseado nos critérios apresentados

por Badheka [18] para a aplicação da técnica com o processo MIG/MAG.

Conforme já foi apresentado no item 3.3 deste trabalho, o chanfro utilizado no processo MIG/MAG seria "...uma junta de soldagem com chanfro reto ou, em alguns casos, para compensar as deformações produzidas pela contração térmica, em "V" com ângulos menores do que  $10^\circ$  de preparação, não possuindo uma abertura, na parte mais estreita, maior do que 12 mm". Na figura 20 são mostrados alguns tipos de chanfro que podem ser utilizados para esta técnica com todos os processos de soldagem.

Muitas outras geometrias de chanfro podem ser utilizadas, cada uma definida em função da quantidade de passes que será aplicada por camada, do processo que será utilizado, das limitações técnicas dos equipamentos existentes e das características do componente que será soldado. As características dos chanfros utilizados nesta técnica são diversificadas e sempre buscam atender ao maior número possível de condições de restrição e requisitos.

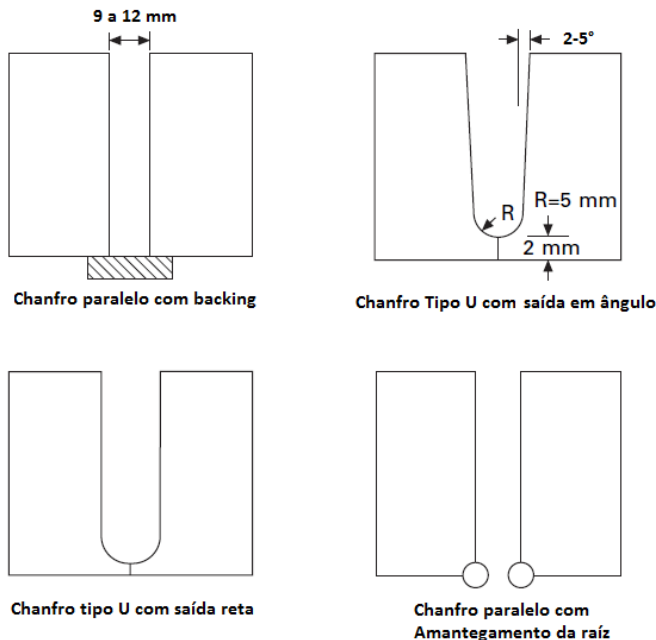


Figura 20- Diferentes tipos de chanfro para soldagem em chanfro estreito [6]

### 3.3.4 Principais Problemas ao Soldar em Chanfro Estreito

Para uma execução da soldagem em chanfro estreito de modo a se obter uma solda isenta de defeitos são pontos importantes que devem ser observados: a preparação adequada do chanfro, o controle dos parâmetros de soldagem e o deslocamento da tocha. Como o processo é aplicado em um espaço confinado, qualquer variação, por mínima que seja, acaba afetando a qualidade final da solda. Isso demanda o uso de equipamentos complexos e de elevado custo, justamente para garantir a máxima estabilidade operacional de todo o sistema.

Problemas tais como falta de fusão das paredes dos chanfros e inclusões de escória são os mais encontrados nesta técnica, seguidos de trincas de solidificação no centro do cordão devido ao elevado grau de restrição da junta e à baixa relação entre a largura e a penetração da solda [13].

O correto dimensionamento e utilização dos meios para alimentar os gases de proteção e o uso de vazão adequada são muito importantes para evitar porosidade. Uma vazão excessiva pode provocar vórtices que puxam ar atmosférico para dentro do chanfro e, desta forma, geram poros na solda. Uma vazão baixa demais irá impossibilitar a proteção da poça fundida e do metal a alta temperatura, também sendo responsável pela instabilidade do arco e as consequentes falhas na solda.

A instabilidade de cada parâmetro de soldagem gera transtornos operacionais. A tensão do arco é uma das principais variáveis responsáveis pela penetração nas paredes laterais e na parte inferior da poça fundida. Uma tensão muito baixa pode resultar em falta de fusão, em contrapartida, uma muito alta pode gerar mordeduras.

A corrente de soldagem tem influência na geometria do cordão, estabilidade do arco e taxa de deposição. A corrente deve estar de acordo com a tensão, velocidade de deslocamento e gás de proteção. Uma corrente muito alta pode causar instabilidade do arco, excesso de respingos e até falta de penetração. Uma corrente baixa demais pode causar falta de fusão, penetração e instabilidade do arco [13].

Além das dificuldades apontadas, se for necessário realizar qualquer tipo de reparo num chanfro estreito, gera-se um grande problema, justamente pela dificuldade de se encontrar ferramentas

disponíveis capazes de remover as imperfeições que podem aparecer em locais de difícil acesso. Por estas razões, muito tem se trabalhado para aperfeiçoar os dispositivos e equipamentos utilizados para realizar a soldagem com esta técnica, além de poder estabelecer os parâmetros adequados para cada tipo de material e processo.





## 6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais alcançados e nas análises realizadas é possível afirmar o seguinte.

### 6.1 EM RELAÇÃO À TOCHA ESPECIAL PARA SOLDAGEM MIG/MAG EM CHANFRO ESTREITO

- O material utilizado na fabricação da tocha (cobre) se mostrou adequado, pois, além de ter elevada usinabilidade (necessária para furar os canais internos de refrigeração), apresenta elevada condutividade elétrica (para possibilitar a passagem de corrente entre o alimentador e o bico de contato sem produzir excessivo aquecimento por efeito Joule) e condutividade térmica (para aumentar a eficiência da refrigeração).

- Para os níveis de corrente e potência do arco que foram utilizados, a refrigeração da tocha mediante ar comprimido se mostrou satisfatória. Isso simplifica em muito a fabricação da tocha, a manutenção da vedação, além de dispensar o uso de equipamentos auxiliares para o resfriamento e bombeamento de fluido refrigerante.

- A tocha pode ser construída suficientemente compacta na direção transversal à solda, de modo que, mesmo realizando a soldagem em um chanfro bastante estreito (de apenas 9,5 mm de distância entre os bordos) era mantida uma folga entre as paredes da tocha e os bordos de aprox. 1,1 mm, para diminuir a probabilidade de ocorrer contatos acidentais e travamentos durante a soldagem.

- A forma geométrica da tocha projetada permite ao operador de soldagem visualizar o arco e a deposição de material durante a soldagem, de modo que ele pode efetuar as correções de trajetória da tocha, para mantê-la centralizada na junta.

- O sistema de proteção da poça de fusão é um dos pontos mais importantes para garantir a funcionalidade desta técnica de soldagem, visto que uma proteção adequada da poça em um espaço confinado é um fator crítico, principalmente devido à turbulência que pode ser gerada na cortina gasosa. Quanto a isso, mostrou-se adequado o uso na tocha de canais de alimentação do gás divergentes, que permitem a expansão do gás sem turbulência à medida que o mesmo sofre aumento de temperatura.

- Devido à possibilidade de ocorrer contato entre a tocha e os bordos, foi colocado material isolante elétrico nas laterais da tocha, que se manteve íntegro, mesmo com as altas temperaturas a que esteve exposto e o contato eventual com os bordos.

- É necessário que os meios utilizados para o deslocamento longitudinal durante a soldagem que não apresentem oscilações transversais e nem longitudinais durante o trajeto a ser soldado, visto que as folgas existentes entre a tocha e os bordos durante a soldagem não ultrapassam 2,0 mm no total. Também é requerida a capacidade de realizar regulagens em tempo real na posição transversal à junta e na DBCP.

- É possível a independência de sistemas importados de alto custo e complexidade.

## **6.2 EM RELAÇÃO À ESPECIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM EM CHANFRO ESTREITO**

- O chanfro em “U” com ângulo menor do que 10° foi adequado para evitar o trancamento da tocha durante a soldagem que poderia ocorrer devido à contração transversal experimentada pela junta após cada passe.

- Com a geometria da junta em “U” utilizada, foi possível reduzir o número de passes para soldar chapas de 50,8 mm de 33 para aproximadamente 12 e a massa de material a adicionar por cada metro de junta de 10,5 para 4,3 kg. Isso traz como benefícios uma diminuição significativa no tempo de processamento, no custo dos consumíveis, nas distorções e nas tensões residuais.

- Nas condições em que foi aplicado o modo de transferência metálica por curto-circuito não parece recomendável para a soldagem de chanfro estreito, devido ao elevado índice de respingos que o processo apresenta. Como não é possível remover posteriormente os respingos (devido ao pequeno espaço disponível para a ferramenta), os respingos remanescentes ocasionam a redução da área livre do chanfro, provocando o trancamento da tocha dentro do chanfro durante a soldagem. Além disso, produzem turbulência na cortina do gás de proteção e, como resultado, porosidade devida à perda de eficácia da proteção.

- A utilização do modo de transferência pulsada convencional (isto é, com potência do arco constante) possibilitou a eliminação dos respingos, mas foi observada falta de fusão dos bordos.

- Com o modo de transferência duplo pulsado (isto é, com variação da potência do arco em baixas frequências) foi possível, além de reduzir a quantidade de respingos, evitar a porosidade e falta de fusão. Ao microscópio foi possível constatar que não havia defeitos pequenos, como micro-trincas ou micro-poros. Portanto, dos três modos de transferência testados, este é o único indicado para a soldagem MIG/MAG em chanfro estreito, dentro das condições presentes.

- Sendo a soldagem em chanfro estreito uma soldagem multipasses, cada um dos passes realizados produz tanto nos cordões anteriores como no metal de base (neste estudo, um aço ao carbono) refino de grão. Esse efeito é benéfico, pois além de aumentar a resistência mecânica (a qual foi avaliada indiretamente pela dureza), também aumenta a tenacidade.

- As soldas realizadas pelo processo MIG/MAG em chanfro estreito, tanto ao utilizar pré-aquecimento quanto ao deixar de utilizá-lo (o que seria benéfico, por reduzir os custos e tempos de processamento), foram satisfatórias. As soldas apresentaram-se isentas de descontinuidades e com propriedades mecânicas superiores às exigidas nas normas. Nos ensaios de tração a ruptura ocorreu sempre fora da solda (isto é, longe do MS e ZAC) e os ensaios Charpy com entalhe na ZAC apresentaram valores de resistência ao impacto acima de 150 J e, portanto, muito maiores que o valor frequentemente recomendado em normas para estruturas soldadas (27 J).



## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para ampliar o desenvolvimento desta técnica de soldagem em chanfro estreito, sugere-se realizar os seguintes estudos:

- a) Realizar soldagens utilizando a transferência por curto-circuito controlado, visando eliminar os problemas de respingos. Em tal tipo de transferência poderia ser implementado o uso de CO<sub>2</sub> como gás de proteção, por suas vantagens de menor custo e aumento da penetração;
- b) Desenvolver uma tocha que possibilite a utilização de soldagem com duplo arame, na configuração conhecida como “tandem” (um arco atrás do outro), visando não só aumentar a taxa de deposição (e, com isso, uma redução ainda maior dos tempos de soldagem), mas também garantir a fusão dos bordos;
- c) Implantar os parâmetros de soldagem MIG/MAG em um equipamento de soldagem com programação aberta para a dupla pulsação, de modo que possam ser variados os tempos de pulso térmico visando aumentar o aquecimento dos bordos;
- d) Desenvolver sistema de deslocamento da tocha automatizado, que faça correções em tempo real tanto da trajetória (para que o arco se mantenha centralizado na junta), como da altura (para que seja mantida a DBCP);
- e) Projetar uma tocha com possibilidade de variação do ângulo de ataque.



## REFERÊNCIAS

- [1] AWS D1.1 **Structural Welding Code-Steel**, M:2004,19th ed. 499 p.
- [2] AWS Welding Handbook, v. 2 - **Welding Process**, AWS, USA, 8th ed. NN p.
- [3] ASM Handbook, v. 6 **Welding Brazing and Soldering**, 1993, 572 p.
- [4] ESAB, **Soldagem MIG/MAG**, Apostila (2005) 135 p. Disponível em: <<http://www.esab.com.br>>. Acesso em: 27/09/2011.
- [5] COSTA, S.C.; Ribeiro, L.G. Otimização dos Parâmetros de Pulso de um Processo de Soldagem MIG Através de Análise Fatorial em Dois Níveis. In: **XXI ENEGEP Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**, Rio de Janeiro, Abril de 2001.
- [6] NORRISH, J. **Advanced Welding Processes: technologies and process control**, Woodhead Publishing in Materials: Cambridge – Inglaterra, 3th Ed, 2006, 288 p.
- [7] SILVA, C.L.M. The Influence of Double Pulse on Porosity Formation in Aluminum GMAW. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 171, 2006, p. 366-372.
- [8] BARRA, S. et al. Avaliação dos Efeitos da Variação dos Parâmetros/Procedimentos de Soldagem e Automação, sobre a Planicidade e Aspecto Superficial dos Revestimentos Empregados em Turbinas Hidráulicas. In: **XXIV ENTS**, Fortaleza, Setembro 1998.
- [9] DUTRA, J. et al. O Processo MIG/MAG Pulsado com Pulsação Térmica. In: **XXI ENTS**, Caxias do Sul, Junho 1995, p. 889-902.
- [10] STREET, J. A. **Pulsed Arc Welding**. Abington Publishing Special Report, Cambridge. 1990.
- [11] Man, E.D. SIF Group at the Foundation of Dutch Wind Energy; **Svetsaren**, Nº 1-2008, p. 21.
- [12] BADHEKA, V. J.; AGRAWAL, S. K. Microstructural Investigation of Weld Metal in Low-Carbon Steel Welded by NG-GMAW, **Welding and Cutting**, v. 8, Nº 4, 2009, p. 199-206.

- [13] MALIN, V. Y. The State of the Art of Narrow Gap Welding Part I. **Welding Journal**, v. 62, Nº 4, 1983,p. 22-30.
- [14] MALIN, V. Y. The State of the Art of Narrow Gap Welding Part II. **Welding Journal**, v. 62, Nº 6, 1983, p. 37-46.
- [15] BRACARENSE, A. Q. **Gas Metal Arc Welding**, Artigo Infosolda, 2003. Disponível em: < <http://www.infosolda.com.br>>. Acesso em: 27/09/2011.
- [16] UNITED STATES PATENT – PATENT NUMBER 4187410 – **Method of Multi-pass Narrow Groove Arc Welding**, 1980
- [17] MODENESI, P. J **Statistical Modeling of the Narrow Gap Gas Metal Arc Welding Process**, Tese Doutorado, Cranfield Institute of Technology England,1990, p. 294.
- [18] BADHEKA, V. J.; AGRAWAL, S. K. Design and Development of GMAW torch for Narrow Gap Welding. **Welding and Cutting**, v. 6,No. 5, 2007, p. 264-270.
- [19] "POLYSOUDE, **Narrow groove welding with oscillating electrode**, video disponível em: <<http://www.polysoude.com/power-generation-petrochemical-industry/power-generation>>. Acesso em: 08/07/2012.
- [20] Korhonen,M.;Luukas, M.;Hänninen,H. Narrow Gap GTA Welding of Stainless Steels, **Svetsaren**, Nº 1-2000, p. 3.
- [21] UNITED STATES PATENT – PATENT NUMBER 3924095 – **Narrow Groove Welding**, 1975
- [22] FORTES, C.; ARAÚJO, W. **Metalurgia da Soldagem**. Apostila ESAB, 15/04/2004
- [23] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, division I. **Rules for construction of pressure vessels**. July 2007 ed. New York.



## Anexo 1 - Características e Propriedades das Placas Isolantes SISANITE SR 328.51.



Electrical Insulating Materials

### SISANITE SR 328.51 Placas de Calefação

#### DESCRIÇÃO

SISANITE SR 328.51 é uma placa de calefação rígida, composta por camadas de papel de mica muscovita não-calcinada, impregnada com baixo teor de resina resistente ao calor, prensada e curada.

#### UTILIZAÇÃO

É usada como suporte de resistências em tostadores, secadores de cabelo, ferros elétricos, etc. Pode ser utilizada também como isolante térmico.

#### DADOS TÉCNICOS

Produto	328.51		
Densidade	IEC 371-2	g/cm <sup>3</sup>	2,30 ± 0,20
Composição			
Papel	IEC 371-2	%	90 ± 2
Resina	IEC 371-2	%	10 ± 2
Perda de Peso	550°C	%	≤ 1
Resistividade	ASTM D 257		
	23°C	□X cm	≥ 10
Resistência à Tração	ISO 178	N/mm <sup>2</sup>	≥ 100
Resistência à Flexão	ISO 178	N/mm <sup>2</sup>	≥ 250
Absorção de Água	DIN 53475	%	≤ 1
Fumaça e Odor			virtualmente nada
Estampabilidade			excelente

#### FORNECIMENTO

SISANITE SR 328.51 é disponível em placas de 1.020 X 550 mm e espessura de 0,2 a 10 mm. Tolerância de espessura de acordo com padrão IEC 371-3-3. Pode ser fornecido também em tira ou peças estampadas. Placas com espessura superior a 1,5 mm não são retilhadas. As quantidades pedidas são entendidas como ± 10 %.

Os dados constantes neste informativo visam ajudar aos clientes a determinar se os nossos produtos são adequados às suas necessidades. Não aqui deve constituir qualquer garantia expressa ou implícita, incluindo qualquer garantia de mercado ou aplicação. Nem significa aprovação de alguma lei ou licença a ser obtida. O cliente deve testar o material para determinar se ele é aplicável, ou se nossos arranjos são válidos, em seu caso particular.

Von Roll Isolca do Brasil - Av. Aruanã, 201 - Alphaville - Barueri - SP Zip Code: 06410-010  
Tel: ++ 55 11 4208 6886 Fax: ++ 55 11 4183 8788