

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DE PROCESSOS MIG/MAG
DERIVATIVOS UTILIZANDO-SE SIMULADOR DE
SOLDAGEM DE DUTOS POR RETIFICAÇÃO**

JOSÉ ENRIQUE VARGAS AURES

ORIENTADOR: SADEK CRISÓSTOMO ABSI ALFARO (UnB)

CO-ORIENTADOR: LOURIEL OLIVEIRA VILARINHO (UFU)

TESE DE DOUTORADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

PUBLICAÇÃO: ENM.TD-05/13

BRASÍLIA/DF: JULHO – 2013

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DE PROCESSOS MIG/MAG
DERIVATIVOS UTILIZANDO-SE SIMULADOR DE
DUTOS POR RETIFICAÇÃO**

JOSÉ ENRIQUE VARGAS AURES

TESE 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 DOUTOR EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

APROVADA POR:

Prof. Dr: Sadek Crisóstomo Absí Alfaro: **Orientador** (UnB)

Prof. Dr: Louriel Oliveira Vilarinho: **Co-Orientador** (UFU)

Prof. Dr: Guilherme Caribé de Carvalho (UnB)

Prof. Dr: Carlos Humberto Llanos (UnB)

Prof. Dr: Demóstenes Ferreira Filho (UFG)

Prof. Dr: Victor Orlando Gamarra Rosado (UNESP)

Brasília/DF, Julho de 2013

FICHA CATALOGRÁFICA

AURES, JOSÉ ENRIQUE VARGAS

Avaliação de Processos MIG/MAG Derivativos Utilizando-se Simulador de Dutos por Retificação [Distrito Federal] 2013.

xxiii, 173p, 210 x 297mm (ENM/FT/UnB, Doutor, Sistemas Mecatrônicos, 2013).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1 SDDR

4 Passe de Raiz

2 Soldagem Circunferencial

5 Chanfro Estreito

I. ENM/FT/UnB

II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AURES, J. E. V. (2013). Avaliação de Processos MIG/MAG Derivativos Utilizando-se Simulador de Dutos por Retificação [Distrito Federal] 2013. Tese de Doutorado em Sistemas Mecatrônicos. Publicação: ENM.TD-05/13, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 173p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: José Enrique Vargas Aures

TÍTULO: Avaliação de Processos MIG/MAG Derivativos Utilizando-se Simulador de Dutos por Retificação

GRAU: Doutor

ANO: 2013

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

José Enrique Vargas Aures

QPN 19, Conjunto G, Casa 06, P-Norte

72.242-807, Ceilândia, Brasília /DF – Brasil

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus sobre todas as coisas e por me permitir chegar até aqui.

Ao Professor Sadek Crisóstomo Absí Alfaro, pela ajuda, apoio e amizade que me brindou no Mestrado e agora culminando o Doutorado. Pessoa fundamental para eu ter alcançado este alvo.

Ao meu também Orientador, Professor Louriel Oliveira Vilarinho, pela ajuda, compreensão e amizade durante o Mestrado e Doutorado, com quem aprendi a ver as coisas com muita mais praticidade, entre muitas outras.

Para a minha família, por que mesmo de longe sempre estiveram do meu lado o tempo todo, me apoiando e dando forças nos momentos difíceis nesta etapa. Meus pais: Enrique, Carmen. Irmãos: Miriam, Ruth, Lucho e Milagros e com carinho especial para os meus filhos: Wendy e José, para todos eles meu maior agradecimento.

A uma pessoa muito importante nesta etapa, que sem aparecer fez diferença.

Ao programa da Pós-graduação da Faculdade de Tecnologia da UnB e ao GRACO/UnB, pela oportunidade brindada.

Meu agradecimento eterno também ao Laprosolda/UFU, e aos Professores que conformam este grupo: Scotti, Valtair, Louriel e Vladimir, por me permitir ser parte dessa família e pelos ensinamentos brindados.

À CAPES, pelo suporte financeiro.

Aos eternos amigos: Hélio, Ribeiro, Lindberg, Saldanha, Thonson, Fábio, Zé Francisco, Victor, Anna, Max, Carmem, Marcelo, Diandro, Luis, Juanito, pela ajuda, amizade e companherismo, aprendi muito com eles.

Aos técnicos da oficina: Passarinho, Lazinho, Carlão e Reginaldo.

A todos os mencionados e outros que com certeza esquecí, muito obrigado.

RESUMO

AVALIAÇÃO DE PROCESSOS MIG/MAG DERIVATIVOS UTILIZANDO-SE SIMULADOR DE SOLDAGEM DE DUTOS POR RETIFICAÇÃO

Autor: José Enrique Vargas Aures.

Orientador: Sadek Crisóstomo Absí Alfaro.

Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos.

Brasília, Julho de 2013.

A união de tubos pelo processo de soldagem começa com a deposição do passe de raiz, que pode ser realizado perante diferentes procedimentos, metodologias e em diferentes configurações de juntas. Na soldagem de topo, externa e sem abertura de raiz, a altura da face de raiz é determinante para obter penetração total. Em alguns casos, uma cobre-junta de cobre pode ser usada para evitar vazamentos, no entanto, este cobre pode ocasionar inclusões e até iniciar corrosão. Entretanto, pesquisas nesta área são onerosas devido aos altos custos dos tubos, além das despesas na logística devido ao transporte destes até centros de pesquisa. Com isto, neste trabalho desenvolveu-se um equipamento denominado de Simulador de Soldagem de Dutos por Retificação (SSDR), o qual realiza uma soldagem com características semelhantes às de uma soldagem circunferencial, mas realizando a soldagem em chapas planas, assim, o metal de base usado é chapa plana ao invés de tubo. Este equipamento foi utilizado para avaliar processos derivativos aplicados ao passe de raiz obtido pela simulação física da soldagem circunferencial, e para isto, foi realizada a simulação da soldagem externa de um tubo de 8” de diâmetro nominal, na progressão descendente de 180° (meia cana), em junta de chanfro estreito. Numa segunda abordagem é apresentada uma metodologia usada para determinar a altura da face de raiz ou nariz, a qual permite realizar o passe de raiz pelo lado externo do tubo, em soldagem de topo sem abertura de raiz e sem utilizar cobre-junta. A partir do tamanho correto encontrado para a face de raiz, foram realizados dois processos de simulação, em juntas com e sem cobre-junta e posteriormente foram realizadas soldagens de tubos de forma convencional com sistema circunferencial. Os processos de soldagem MIG/MAG por curto circuito derivativo utilizados foram baseados nas tecnologias STT (*Surface Tension Transfer*), CMT (*Cold Metal Transfer*) e RMD (*Regulated Metal Deposition*), o processo Curto Circuito Convencional não se mostrou apropriado para este tipo de junta. Ensaios de macrografia foram realizados, verificando-se um bom passe de raiz e sem defeitos internos, validando com isto a metodologia apresentada, assim como o funcionamento do SSDR.

Palavras-chave: SSDR; Soldagem Circunferencial; Passe de Raiz; Chanfro Estreito.

ABSTRACT

AVALIATION OF DERIVATIVE MIG/MAG PROCESSES USING PIPELINE WELDING SIMULATOR BY RECTIFICATION

Autor: José Enrique Vargas Aures.

Orientador: Sadek Crisóstomo Absí Alfaro.

Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos.

Brasília, Julho de 2013.

The pipe union by the welding process begins with the deposition of the root pass, which can be performed before different procedures, methodologies and different joint configurations. In butt welding, external and without open root, the height of the root face is critical for complete penetration. In some cases, a copper backing can be used to prevent leaks, which, moreover, can lead inclusions and initiate corrosion. However, researches in this area are expensive due to high cost of tubes plus expenses due to logistics and transport of these to the research center. With this, in this work has developed a device nominated Pipeline Welding Simulator by Rectification (PWSR), which performing a welding with similar characteristics to those of a circumferential weld, but performing welding on flat plate, thus, the base metal is flat plate instead of tube. This equipment was used to evaluate processes derivatives applied to the root pass obtained by physical simulation of welding circumferential, and for this, was carried out the simulation of a tube of 8 inch of nominal diameter, in downward welding progression of 180°, in narrow groove joint. In a second approach is presented a methodology used to determine the height of the root face, which allows performing a root pass on the outside of the tube in butt welding without root opening and without backing. From the correct size found for the root face, were carried out two procedures of physical simulation, in joints with and without backing and subsequently welds of the tubes were carried out with conventional pipe circumferential system. The welding process MIG/MAG by derivative short circuit used were based on technologies STT (Surface Tension Transfer), CMT (Cold Metal Transfer) and RMD (Regulated Metal Deposition), the conventional short circuit process is not appropriate for this joint type. Macrograph tests were performed verifying that root pass presents no internal defects, validating with it the methodology presented, as well as the operation of the PWSR.

Key Word: PWSR; Circumferential Welding; Root Pass; Narrow Gap.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fluxograma de desenvolvimento do trabalho.....	7
Figura 2.1 – Evolução dos aços usados na fabricação de tubos com grande diâmetro para transporte de óleo e gás (GORNI, et. al, 2009)	9
Figura 2.2 – Oscilograma de um ciclo completo de transferência por curto-circuito (modificado de GOMES, 2006).....	13
Figura 2.3 – Oscilogramas de corrente e tensão para o processo STT, relacionados com gráficos das etapas de transferência (modificado de LINCOLN, 2010c)	17
Figura 2.4 – Representação gráfica da regulagem dos valores do TO do oscilograma de corrente do processo STT.....	18
Figura 2.5 – Gráficos dos formatos da face e raiz, do cordão de passe de raiz, influenciados pelos parâmetros I_p e I_b respectivamente (modificado de LINCOLN, 2010b).....	19
Figura 2.6 – Oscilograma da corrente para o processo RMD, mostrando os 7 estágios de transferência (modificado de MILER, 2009).....	20
Figura 2.7 – Oscilograma da corrente e tensão do processo RMD.....	21
Figura 2.8 – (a) alimentador de arame inserido na tocha e (b) <i>buffer</i> ou pulmão mostrando o conduto flexível.....	22
Figura 2.9 – Oscilogramas da corrente e tensão do processo CMT.....	23
Figura 2.10 – Terminologia usada para descrever as partes que conformam uma junta de topo com chanfro em “V” considerando-se abertura de raiz (modificado de AWS, 1989).....	25
Figura 2.11 – Algumas configurações de juntas: (a) junta em “V” básica, (b), (c) e (d) (Hudson 2004), (e) junta específica (Dunder 2005).....	26
Figura 2.12 – Representação da diminuição do volume de solda a ser depositada quando da diminuição do ângulo do chanfro.....	27
Figura 2.13 – Diferença entre as áreas a serem preenchidas considerando chanfro estreito e chanfro em “V”	29
Figura 2.14 – Espessura de solda em passe de raiz – 5,6 mm; elimina o retrabalho do passe quente ER70S-6, 1,2 mm – 100% CO ₂ (ABS, 2011).....	31

Figura 2.15 – Concavidade interna (API 1104, 2000).....	31
Figura 2.16 – Representação da forma prática para obter penetração em junta de topo sem abertura de raiz, modificando: (a) parâmetros de soldagem e (b) espessura do nariz.....	33
Figura 2.17 – Forma prática para obter penetração em junta de topo com abertura de raiz, modificando: (a) abertura da raiz e (b) espessura do nariz.....	34
Figura 2.18 – Disposição das chapas com abertura variável utilizadas para encontrar abertura de raiz apropriada para um determinado conjunto de parâmetros de soldagem.....	35
Figura 2.19 – Posicionamento dos tubos para realização da soldagem circunferencial (modificado de AWS, 2000).....	37
Figura 2.20 – Posições de soldagem com respeito ao posicionamento do eixo do tubo desde 0° até 90° segundo AWS3.0 (2010).....	37
Figura 2.21- Identificação das posições de soldagem ao redor do tubo pela comparação com a face de um relógio.....	38
Figura 2.22 – Soldagem semiautomática (a) vertical descendente e (b) sobrecabeça.....	39
Figura 2.23 – Soldagem semiautomática de passe de raiz pela parte interna do tubo.....	39
Figura 2.24 – Representação de uma soldagem na progressão descendente mostrando o posicionamento da tocha ao longo da soldagem em 180°.....	42
Figura 2.25 – Cabeçotes simples (a) <i>Vermaat Welding Bug</i> e (b) <i>RMS Welding System</i> (BLACKMAN; DORLING, 2002).....	43
Figura 2.26 – Cabeçotes para soldagem orbital com duas tochas: (a) <i>Saturnax Welding System</i> , (b) <i>CRC – Evans P500</i> e (c) <i>Vermaat</i> (Blackman and Dorling, 2002).....	43
Figura 2.27 – (a) Tocha de duplo arame – <i>Tandem Wire Welding</i> (Blackman and Yapp, 2001) e (b) um cabeçote <i>Dual Tandem</i> (Lopes, 2006).....	44
Figura 2.28 – Eixos do Tartilope V4.....	45
Figura 2.29 – Tartilope V4 da IMC usado no (a) Lapsolda-UFU e (b) GRACO-UnB.....	46
Figura 2.30 - Desalinhamento da junta Z em relação ao centro do tubo (Carvalho, 2009).....	46
Figura 2.31 – Chanfradeiras em funcionamento em (a) campo (Fortes, 2004), (b) oficina e (c) aspecto final do chanfro no tubo (<i>Tri ToolL INC.</i> , 2010).....	47

Figura 2.32 – Desalinhamento ou Hi-Lo originado pela diferença entre diâmetros internos dos tubos (modificado de Clarke and Gooch, 2011).....	48
Figura 2.33 – (a) <i>Counterboring Tool</i> , diâmetro interno do tubo: (b) homogêneo e (c) não homogêneo, após processo de usinagem (Clarke and Gooch, 2011).....	49
Figura 2.34 – Ferramenta para medição da configuração da junta - <i>Bevel Pipe Checker</i> (OMS, 2008).....	49
Figura 2.35 – (a) Acopladeiras: para posicionar cobre-junta de cobre e (b) formando uma câmara de purga de gases para proteção da raiz no passe de raiz (b) (<i>Tri Tool INC</i> , 2010).....	50
Figura 2.36 – Equipamento que providencia alinhamento do tubo, cobre-junta e arredodamento do tubo simultaneamente (<i>Tri Tools INC</i> , 2010).....	50
Figura 2.37 – Posicionamento do dispositivo para soldagem orbital interna (Fortes, 2004)....	51
Figura 2.38 – Detalhe das tochas na máquina de soldagem interna (a) e Máquina de soldagem interna em operação (b) (Fortes, 2004).....	52
Figura 3.1 – Posicionamento da tocha nas posições críticas da soldagem circunferencial e o seu equivalente de soldagem em chapa plana.....	56
Figura 3.2 – Suporte para fixação e posicionamento de placas de teste.....	57
Figura 3.3 – Detalhe da mesa e componentes do suporte.....	58
Figura 3.4 – Detalhe da mesa para soldagem (a) sem cobre-junta e (b) com cobre-junta.....	59
Figura 3.5 – Chapas de testes usadas neste trabalho, fixadas para soldagem (a) com cobre-junta e (b) sem cobre-junta.....	59
Figura 3.6 – Suporte com a mesa e chapas de teste posicionadas para a soldagem (a) plana, (b) vertical e (c) sobrecabeça.....	60
Figura 3.7 – Vista inferior da mesa posicionada para uma soldagem vertical descendente e sem cobre-junta, podendo-se ver o avanço da parte aquecida pelo arco ao longo da soldagem.....	61
Figura 3.8 - Representação esquemática dos procedimentos de: (a) soldagem circunferencial convencional e (b) do simulador.....	64

Figura 3.9 – Vista em perspectiva do simulador e seus componentes.....	65
Figura 3.10 – Esquema da disposição do Tartilope e das placas de teste.....	66
Figura 3.11 – Simulador construído e montado em vista: (a) isométrica e (b) frontal.....	67
Figura 3.12 – Comprimento S na chapa e no tubo, que devem ser iguais para que a soldagem de simulação tenha as mesmas características da soldagem convencional.....	68
Figura 3.13 – Detalhe do motor de corrente contínua e dos sistemas de redução que fornecem o movimento rotacional ao eixo excêntrico.....	69
Figura 3.14 – Curva de calibração do simulador.....	70
Figura 3.15 – Medidas da chapa com o nariz inclinado.....	74
Figura 3.16 – Nariz variável ao longo do comprimento do metal de base	74
Figura 3.17 – Linhas riscadas na parte inferior da junta para maior controle do tamanho do nariz.....	74
Figura 3.18 - Disposição final da junta com a altura do nariz variável, com valores de: (a) 0 mm e (b) 4 mm.....	75
Figura 3.19 – (a) Ponto de início da solda representando um tamanho de penetração obtido com uma determinada energia e (b) ponto de penetração total onde o tamanho “h” é o tamanho de nariz encontrado para essas condições	75
Figura 3.20 – Posicionamento das chapas de teste com a superfície do “nariz inclinado” perpendicular ao deslocamento da tocha nas 3 posições testadas.....	77
Figura 4.1 – Formato da ferramenta de aço rápido a ser utilizado na conformação da junta...79	79
Figura 4.2 – Dimensões da junta a ser utilizada na etapa de parametrização.....	79
Figura 4.3 – Diagrama do posicionamento da chapa e a ferramenta durante o processo de usinagem para a conformação da junta.....	80
Figura 4.4 – Configuração final da junta onde “h” é o valor de nariz encontrado, para cada processo de soldagem, com o método do chanfro inclinado	83
Figura 4.5 – Seção do tubo durante o processo de usinagem de uniformização do diâmetro interno e faceamento.....	86

Figura 4.6 – Posição da ferramenta de aço rápido no ponto final da construção do formato da junta no tubo.....	87
Figura 4.7 – Seção de tubo a ser utilizado após as diversas etapas de usinagem.....	87
Figura 4.8 – Configuração final de tubos prontos para a soldagem e detalhes da fixação e alinhamento entre eles.....	88
Figura 4.9 – Formato final da junta nos tubos.....	88
Figura 4.10 – Sistema de fixação de tubos para soldagem circunferencial.....	89
Figura 4.11 – Detalhe do posicionamento da tocha e do arame dentro do chanfro.....	90
Figura 4.12 – Relação de velocidades entre a velocidade do Tártilope e a velocidade de soldagem.....	90
Figura 4.13 – Posição de corte transversal no tubo para extração dos corpos de prova para análise de macrografia.....	91
Figura 4.14 – Fonte <i>Power Wave 450/STT</i> com alimentador de arame <i>Power Fedd 10M</i> da Lincoln Electric, usada para o processo STT e curto-circuito convencional.....	93
Figura 4.15 – Fonte <i>PipePro 450 RFC</i> com alimentador de arame <i>PipePro Dual DX</i> usada para soldagem com o processo RMD.....	94
Figura 4.16 – Fonte <i>TPS 5000 CMT</i> , utilizada na soldagem com o processo CMT.....	95
Figura 4.17– Braço mecânico <i>Arc Mate 100 iBe</i> com 6 graus de liberdade da FANUC.....	96
Figura 4.18 – Tocha <i>PullMig CMT</i> da Fronius.....	96
Figura 4.19 – Esquema da montagem do sistema de aquisição (modificado de Souza, 2010).....	97
Figura 4.20 – Placa <i>NI USB-6009</i> (NATIONAL INSTRUMENTS, 2010).....	98
Figura 5.1 – Seção transversal dos cordões de passe de raiz obtidos com os parâmetros da corrida n° 2 do planejamento experimental para o processo STT.....	101
Figura 5.2 – Oscilogramas de tensão e corrente da Corrida 2 do planejamento STT, nas posições plana, vertical e sobrecabeça.....	103

Figura 5.3 - Parte inferior da junta com nariz inclinado após o processo de soldagem com STT, ressaltando-se com círculos os pontos onde a penetração total se inicia em cada posição.....	104
Figura 5.4 – Aspectos da face (a) e raiz (b) dos cordões de solda obtidos com nariz de 1,6 mm, em chapas de 10 mm de espessura e sem cobre-junta, com o STT.....	105
Figura 5.5 – Seção transversal dos cordões de passe de raiz, das três posições testadas, realizados para validar o tamanho de nariz de 1,6 mm encontrado para o processo STT.....	105
Figura 5.6 – Formato da (a) face e (b) raiz dos cordões de solda obtidos no processo de simulação, em chapas de 10 mm de espessura e em junta com cobre-junta, com STT.....	107
Figura 5.7 – Formato da (a) face e (b) raiz dos cordões de solda obtidos no processo de simulação, em chapa de 10 mm de espessura, com nariz de 1,6 mm, junta sem cobre-junta, com STT.....	107
Figura 5.8 – Seção transversal do cordão, realizado com o processo de simulação, em pontos onde se ubicam as posições SP, SVD e SSC, em junta que usa cobre-junta, com STT.....	108
Figura 5.9 - Seção transversal do cordão, realizado com o processo de simulação em pontos onde se ubicam as posições SP2, SVD2 e SSC2, em junta que não usa cobre-junta, com STT.....	108
Figura 5.10 – Formato da (a) face e (b) raiz, dos cordões obtidos em tubos, no processo de soldagem circunferencial, com tamanho de nariz de 1,6 mm e sem cobre-junta com STT (a divisão da escala é de 2 mm).....	110
Figura 5.11 – Seção transversal do passe de raiz obtido na soldagem circunferencial, nos pontos onde se ubicam as posições SP2, SVD2 e SSC2 com STT.....	111
Figura 5.12 – Seção transversal dos cordões de passe de raiz obtidos com os parâmetros da corrida n° 4 do planejamento experimental para o processo RMD.....	113
Figura 5.13 – Oscilogramas de tensão e corrente da corrida n° 4 do planejamento RMD, nas posições plana, vertical e sobrecabeça.....	114
Figura 5.14 - Parte inferior da junta com nariz inclinado após o processo de soldagem com RMD ressaltando-se com círculos os pontos onde a penetração total se inicia em cada posição.....	115

Figura 5.15 – Aspectos da face (a) e da raiz (b) dos cordões de solda obtidos com nariz de 1,65 mm, em chapas de 10 mm de espessura, em junta sem cobre-junta com o RMD.....	116
Figura 5.16 – Seção transversal dos cordões de passe de raiz, realizados para validar o tamanho de nariz de 1,65 mm encontrado para o processo RMD.....	117
Figura 5.17 – Formato da (a) face e (b) raiz dos cordões de solda obtidos no processo de simulação, em chapa de 10 mm de espessura, em junta com cobre-junta, com RMD.....	118
Figura 5.18 – Formato da (a) face e (b) raiz dos cordões de solda obtidos com o processo de simulação, em chapa de 10 mm de espessura, com nariz de 1,65 mm, em junta sem cobre-junta, com RMD.....	119
Figura 5.19 – Seção transversal do cordão, realizado com o processo de simulação em pontos onde se ubicam as posições SP4, SVD4 e SSC4, em junta que usa cobre-junta, com RMD.....	119
Figura 5.20 - Seção transversal do cordão, realizado com o processo de simulação, em pontos onde se ubicam as posições RV4, RVD4 e RSC4, em junta que não usa cobre-junta, com RMD.....	120
Figura 5.21 – Formato da (a) face e (b) raiz, dos cordões obtidos no processo de soldagem circunferencial, sem cobre-junta, com tamanho de nariz de 1,65 mm para o processo RMD (divisão da escala é de 2 mm).....	121
Figura 5.22 – Seção transversal do passe de raiz obtido na soldagem circunferencial, nos pontos onde seu ubicam as posições RP4, RVD4 e RSC4 com RMD.....	121
Figura 5.23 – Cordão desviado para o valor de comprimento de arco -30 com CMT.....	123
Figura 5.24 – Seção transversal dos cordões de passe de raiz obtidos com os parâmetros da corrida n° 3 do planejamento experimental para o processo CMT.....	124
Figura 5.25 – Oscilogramas de tensão e corrente da corrida n° 3 do planejamento CMT, nas posições plana, vertical e sobrecabeça.....	125
Figura 5.26 – Face do cordão desviado depositado na junta com nariz inclinado para o valor de comprimento de arco de +30 com CMT	126

Figura 5.27 – Parte inferior da junta com nariz inclinado após o processo de soldagem com CMT ressaltando-se com círculos os pontos onde a penetração total se inicia para cada posição.....	127
Figura 5.28 – Dimensões da junta considerando o tamanho de nariz de 1,0 mm encontrado pela metodologia proposta para o processo CMT.....	128
Figura 5.29 – Aspectos dos cordões desviados, embora com boa penetração, depositados em chanfro com nariz de 1 mm, em chapas de 10 mm de espessura, em junta sem cobre-junta com o CMT.....	128
Figura 5.30 – Arame com saída reta do bico de contato (a), por correção com o “indireitador de arame” (b).....	129
Figura 5.31 – Seção transversal dos cordões de passe de raiz, realizados para validar o tamanho de nariz de 1,0 mm depositados com CMT em chapas com largura de junta de 6 mm.....	130
Figura 5.32 - Formato da (a) face e (b) raiz dos cordões de solda obtidos no processo de simulação em chapa de 10 mm de espessura, em junta com cobre-junta, com CMT.....	131
Figura 5.33 – Modificações realizadas na largura do nariz resultando numa maior abertura na largura da junta, ressaltadas pelo elipsóide tracejado.....	132
Figura 5.34 – Aspectos da face (a) e da raiz (b) dos cordões de solda obtidos em junta de 10 mm de espessura, no processo de simulação com nariz de 1,0 mm, com largura de junta de 7,0 mm e sem cobre-junta, com CMT.....	132
Figura 5.35 – Efeito dos 3 valores de comprimento do arco: -30, 0 +30, na deposição do cordão na placa de teste com largura de junta de 7 mm.....	134
Figura 5.36 - Seção transversal do cordão, realizado com o processo de simulação em junta sem cobre-junta, com largura de junta de 7 mm, em pontos onde se ubicam as posições CP3, CVD3 e CSC3, com CMT.....	135
Figura 5.37 – Formato da (a) face e (b) raiz do cordão obtido no processo de soldagem circunferencial, sem cobre-junta, com tamanho de nariz de 1,0 mm e largura de junta de 7,0 mm, para o processo CMT (a divisão da escala é de 2 mm).....	136

Figura 5.38 – Seção transversal da soldagem circunferencial, com o CMT, em pontos onde as posições são plana, vertical e sobrecabeça137

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Tabela de parâmetros de entrada e saída a serem considerados para um processo de simulação.....	70
Tabela 4.1 - Tabela dos parâmetros de entrada e saída do “simulador” a ser usada neste trabalho.....	85
Tabela 5.1 – Faixa de regulagem permitida, pela fonte STT, dos parâmetros Corrente de pico (Ip), Corrente de base (Ib) e Tail-Out (TO).....	99
Tabela 5.2 – Variáveis e níveis do envelope de trabalho a serem considerados para o planejamento experimental para o processo STT.....	100
Tabela 5.3 – Matriz de planejamento experimental fracionário (3^{3-1}), em disposição aleatória, para o processo STT.....	100
Tabela 5.4 – Aspectos da face e da raiz dos cordões de solda obtidos com a corrida n° 2, em chapas de 6,3 mm de espessura e com cobre-junta, para o STT.....	101
Tabela 5.5 – Faixa de regulagem permitida pela fonte PIPE PRO™ 450 RFC das variáveis do processo RMD.....	111
Tabela 5.6 – Variáveis e níveis do envelope de trabalho a serem considerados para o planejamento experimental para o processo RMD.....	112
Tabela 5.7 – Matriz de planejamento experimental (3^2) para o processo RMD.....	112
Tabela 5.8 – Aspectos da face e da raiz dos cordões de solda obtidos com a corrida n° 4, em chapas de 6,3 mm de espessura e com cobre-junta, para o RMD.....	113
Tabela 5.9 – Faixa de regulagem da variável, nível do envelope de trabalho e matriz de planejamento para o processo CMT.....	122
Tabela 5.10 – Aspecto da face e raiz dos cordões de solda obtidos com a corrida n° 3, em chapas de 6,3 mm de espessura, com cobre-junta e nas três posições, com CMT.....	124
Tabela 5.11 – Faixa de valores das variáveis usadas para encontrar o envelope de trabalho no curto circuito convencional.....	138
Tabela 5.12 – Envelope de trabalho para o processo curto circuito convencional.....	138

Tabela 5.13 – Planejamento experimental completo, aleatório, para o processo curto circuito convencional.....	139
---	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABS	Associação Brasileira de Soldagem
ANP	Agência Nacional de Petróleo
API	<i>American Petroleum Institute</i>
Ar	Argônio
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ARBL	Alta Resistência Baixa Liga
AWS	<i>American Welding Society</i>
BS	<i>British Standard</i>
CAPS	<i>Cranfield Automated Pipe-welding System</i>
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
DBCP	Distância de Bico de Contato Peça
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>
I	Corrente
IIW	<i>International Institute of Welding</i>
I _b	Corrente de Base
I _m	Corrente média
I _p	Corrente de Pico
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
O ₂	Oxigênio
RMD	<i>Regulated Metal Transfer</i>
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i> (Soldagem por Arco Submerso)

SSDR	Simulador de Soldagem de Dutor por Retificação
STT	<i>Surface Tension Transfer</i>
T_d	Taxa de deposição
TWI	<i>The Welding Institute</i>
TMCP	<i>Termomechanical Control Process</i>
U	Tensão
U_m	Tensão média
V_{al}	Velocidade de alimentação
V_{sold}	Velocidade de soldagem
WERC	<i>Welding Engineering Center</i>

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - OBJETIVOS	3
1.2 – ESTRUTURA DO TRABALHO	5
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 – AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL)	8
2.1.1 – Evolução metalúrgica dos aços ARBL para tubos	8
2.2 – PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG	11
2.2.1 – Transferência por Curto Circuito Convencional	12
2.2.2 –Transferência por Curto Circuito Derivativo	14
2.2.2.1 – Processo de soldagem STT	15
2.2.2.2 – Processo de soldagem RMD	19
2.2.2.3 – Processo de soldagem CMT	21
2.3 – JUNTAS DE SOLDAGEM	24
2.3.1 – Juntas de Chanfro estreito	26
2.4 – PASSE DE RAIZ	29
2.5 – SOLDAGEM DE TUBOS (<i>Pipelines</i>)	35
2.6 – PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	53
3 - DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTOS E PROPOSTA DE METOLOGIA	55
3.1 – SUPORTE PARA SOLDAGEM AUTOMATIZADA EM DIFERENTES POSIÇÕES .	55
3.1.1 – Justificativa	55
3.1.2 – Introdução	55
3.1.3 – Construção	57
3.1.4 – Versatilidade na mudança de posição de soldagem	59
3.2 – CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO DO SIMULADOR DE SOLDAGEM DE DUTOS POR RETIFICAÇÃO - SSDR	61
3.2.1 – Idealização e concepção do SSDR	63
3.2.2 – Construção do SSDR	64
3.2.3 – Considerações de Construção do SSDR	67
3.2.4 – Outras considerações	71
3.3 – MÉTODO DO CHANFRO COM NARIZ INCLINADO	72
4 – METODOLOGIA EXPERIMENTAL	78
4.1 – METODOLOGIA	78

4.1.1 – 1ª Etapa – Parametrização com cobre-junta	78
4.1.2 – 2ª Etapa – Proposta de metodologia para junta sem cobre-junta.....	83
4.1.3 – 3ª Etapa – Simulador de Soldagem de Dutos por Retificação (SSDR).....	84
4.2 – MATERIAIS.....	92
4.3 – EQUIPAMENTOS.....	93
4.3.1 – Fonte e sistema de alimentação para processos STT e curto circuito convencional .	93
4.3.2 – Fonte e sistema de alimentação para o processo RMD.....	94
4.3.3 – Fonte e sistema de alimentação para o processo CMT	94
4.3.4 – Sistema de translação da tocha (Robô)	95
4.3.5 – Sistema de translação da tocha (Tartílope V4).....	96
4.3.6 – Tochas	96
4.3.7 – Suporte para soldagem automatizada em diferentes posições	97
4.3.8 – Simulador de Soldagem de Dutos por Retificação (SSDR)	97
4.3.9 – Sistema de aquisição de dados para monitoramento da tensão e corrente	97
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	99
5.1 – RESULTADOS PARA O PROCESSO STT.....	99
5.1.1 – Resultados da 1ª etapa com STT - Parametrização	99
5.1.2 – Resultados da 2ª etapa com STT – Chanfro inclinado.....	103
5.1.3 – Resultados da 3ª etapa com STT - Simulação.....	106
5.1.4 – Resultados da 4ª etapa com STT – Soldagem circunferencial	109
5.2 – RESULTADOS PARA O PROCESSO RMD.....	111
5.2.1 – Resultados da 1ª etapa com RMD – Parametrização.....	111
5.2.2 – Resultados da 2ª etapa com RMD – Chanfro inclinado.....	115
5.2.3 – Resultados da 3ª etapa com RMD – Simulação	118
5.2.4 – Resultados da 4ª etapa com RMD – Soldagem circunferencial	120
5.3 – RESULTADOS PARA O PROCESSO CMT	122
5.3.1 – Resultados da 1ª etapa com CMT – Parametrização	122
5.3.2 – Resultados da 2ª etapa com CMT – Chanfro inclinado.....	125
5.3.3 – Resultados da 3ª etapa com CMT – Simulação	130
5.3.4 – Resultados da 4ª etapa com CMT – Soldagem circunferencial.....	136
5.4 – RESULTADOS PARA O PROCESSO CURTO-CIRCUITO CONVENCIONAL.....	138
6 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	141
6.1 – SOBRE A 1ª ETAPA - PARAMETRIZAÇÃO	141

6.2 – SOBRE A 2ª ETAPA – METODOLOGIA DA JUNTA COM NARIZ INCLINADO ..	142
6.3 – SOBRE A 3ª ETAPA – PROCESSO DE SIMULAÇÃO.....	142
6.4 – SOBRE A 4ª ETAPA – SOLDAGEM CIRCUNFERENCIAL	142
6.5 – OUTRAS CONSIDERAÇÕES	143
6.6 - TRABALHOS FUTUROS	144
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145

1 - INTRODUÇÃO

Há quase cem anos dizia-se que as reservas de petróleo no mundo só durariam mais 40 anos, há menos de 50 anos acreditava-se que o Brasil não tinha grande potencial petrolífero, há menos de 20 anos entendia-se que descobertas de gás natural não eram economicamente viáveis, há menos de dez anos o pré-sal não era explorado no Brasil e acreditava-se que a Bacia de Santos não teria o mesmo potencial da Bacia de Campos. Quantos mitos ainda cairão por terra diante da evolução das tecnologias e da continuidade das atividades de exploração e produção de petróleo e gás natural?. Atividades exploratórias em blocos concedidos nas “rodadas” de Licitações promovidas pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) permitiram chegar aos reservatórios do pré-sal; descoberta de magnitude raramente vista no mundo e que levaram o Brasil a um novo patamar na geopolítica internacional. Não por acaso, o país vive hoje um momento particular da sua história ligada à indústria de petróleo e gás natural (Rabello, 2012).

O crescimento da indústria petrolífera brasileira, por conta principalmente das descobertas do pré-sal, das metas ousadas da Petrobras de atingir uma produção nacional de 3,32 milhões de barris de óleo equivalente por dia (boe/dia) até 2013 e da expansão do etanol, tem assegurado o combustível necessário para o setor de dutos acelerar, enquanto a malha de dutos avança pelo país adentro e mar afora (Rabello, 2012). Já no cenário internacional, estudos prognosticam que a demanda de gás natural será praticamente o dobro para 2030 (Graf et al., 2003). O consumo de gás, segundo Yapp e Blackman (2004), vai aumentar de 90 trilhões de pés cúbicos, no ano 2000, para 176 trilhões de pés cúbicos para o ano 2025.

O incremento da demanda de energia fornecida pelo gás, petróleo e derivados, no Brasil e no mundo inteiro, faz com que a procura de novas jazidas seja realizada em lugares cada vez mais distantes ou remotos e de difícil acesso. Isto naturalmente gera problemas ou dificuldades. Assim, esses diferentes pontos de localização das jazidas podem originar que os elementos que compõem o petróleo e derivados tenham diferente composição química, além de apresentar diferentes ambientes e condições para a realização da exploração. Isto faz com que novos materiais, com sofisticadas composições químicas e propriedades específicas de funcionalidade, sejam criados para o transporte destes elementos e paralelamente novas ferramentas, estruturas, processos e procedimentos sejam desenvolvidos e utilizados durante

as diferentes etapas de transporte desde o ponto de extração até o usuário final. Com isto, as pesquisas em cada uma destas diversas etapas aumentaram grandemente.

Na área do transporte do gás, petróleo e derivados, é necessário o aumento da capacidade de transporte para poder abastecer a sempre crescente demanda. Para isto, é necessário aumentar a pressão de transporte e conjuntamente aumentar a espessura da parede do tubo mantendo-se o diâmetro ou aumentar o diâmetro do tubo mantendo-se a espessura da parede do mesmo. Isto, logicamente fará com que as despesas e/ou custos de fabricação das tubulações encarregadas do transporte destes elementos sejam mais onerosos devido ao aumento no peso do material de base, ao transporte e aos consumíveis utilizados no processo de união dos tubos perante procedimentos de soldagem.

A soldagem de tubos, com paredes de grande espessura, é realizada pelos passes de raiz, de preenchimento e acabamento. O passe de raiz, o primeiro a ser depositado, é considerado o passe mais importante na soldagem circunferencial devido a que ele determina a velocidade de execução do projeto de união de tubos toda vez que a detecção de defeitos neste passe, após ter finalizado a união, determinará perda de tempo pela retirada do material depositado para concertar os defeitos fazendo, também com isto, que o projeto fique mais oneroso.

Dependendo do projeto, diferentes procedimentos e/ou metodologias podem ser utilizadas para a realização do passe de raiz. Assim, o passe de raiz pode ser depositado pela parte interna ou externa do tubo numa soldagem ascendente ou descendente; uma separação entre as partes a serem unidas, chamada de abertura de raiz, pode ser utilizada dificultando, até certo ponto, manter constante essa abertura ao longo do perímetro do tubo, no momento do posicionamento para a realização da soldagem. Em alguns casos, na soldagem externa do passe de raiz, deve-se utilizar cobre-junta, de cobre, com o intuito de evitar vazamentos e limitar o exagero no reforço da raiz do cordão, embora isto possa causar inclusões do cobre, nesta área, podendo originar porosidades, trincas e até corrosão. Esta cobre-junta é posicionada, por pressão, na linha interna de encosto dos tubos a serem soldados perante uma “acopladeira”, a qual serve também para o alinhamento dos mesmos. O uso de acopladeira é uma despesa adicional ao processo de soldagem além do tempo gasto no posicionamento da mesma dentro dos tubos.

Quando não se usa abertura de raiz, na soldagem de topo em soldagem externa do tubo, um fator determinante na configuração da junta é a face de raiz ou nariz, pois a altura ou espessura dela é a que permite ou dificulta uma total fusão, refletida em penetração, para um determinado conjunto de parâmetros de soldagem. Um bom passe de raiz é conseguido, em testes preliminares, por tentativa e erro, isto é, são escolhidos os parâmetros de soldagem e uma configuração de junta e o passe de raiz é realizado, se penetração total não é conseguida, os valores dos parâmetros de soldagem vão sendo modificados até conseguir penetração desejada ou, caso contrário, se mantêm constantes os parâmetros de soldagem e se vai modificando a configuração da junta, especificamente a espessura da face de raiz. Assim, perante um ou outro método, as condições para conseguir um cordão de passe de raiz, com boas características visuais e boa penetração são atingidas.

Segundo Lamond (2007), o alvo para um processo ideal de soldagem dever ser um que permita a soldagem do passe de raiz sem cobre-junta nem sistemas internos e produza ainda um cordão de raiz com um bom metal de solda com suficiente deposição para assegurar uma boa espessura de cordão. Esta solda deverá também não apresentar mordeduras, falta de fusão ou porosidades e deverá apresentar propriedades mecânicas apropriadas.

Sabe-se, também, que um dos problemas na maioria dos laboratórios de pesquisas na realização de estudos em soldagem de tubos ou soldagem circunferencial é, logicamente, a aquisição dos tubos. Isto se deve à falta de fornecedores ou poucos fabricantes e ao alto custo dos mesmos, além das despesas e perda de tempo que originam o transporte destes tubos desde o ponto de fornecimento até o centro de pesquisa. As despesas, então, diminuiriam se os testes fossem realizados em chapas planas, considerando-se o mesmo material. Mas chapa plana não é tubo.

1.1 - OBJETIVOS

Assim, com o intuito de melhorar ou resolver alguns dos problemas aqui apresentados, nasceu a idéia de desenvolver um equipamento que simule uma soldagem circunferencial através da soldagem em chapas, isto é, que o equipamento realize a soldagem em chapa plana, mas com todas as características de uma soldagem circunferencial convencional, ou seja, em tubos.

Este equipamento, desenvolvido neste trabalho, foi denominado de Simulador de Soldagem de Dutos por Retificação (SSDR) e usará chapas planas como metal de base.

Em outra abordagem deste trabalho, é apresentada uma metodologia denominada “Metodologia do chanfro com nariz inclinado”, a qual visa encontrar, para um determinado conjunto de parâmetros de soldagem, a espessura do nariz apropriado para uma soldagem de topo, sem abertura de raiz e sem utilizar cobre-junta.

Pretende-se com estas duas abordagens, atingir os objetivos principais deste trabalho que são:

- Em primeiro lugar, conceber, construir e validar o SSDR para simulação física da soldagem de tubulações como ferramenta voltada à pesquisa e desenvolvimento da tecnologia de soldagem nesta área;
- Em segundo lugar, perante a “Metodologia do chanfro com nariz inclinado”, facilitar a realização do passe de raiz em qualquer posição de soldagem, com alta confiabilidade e com maior rapidez, sem utilizar cobre-junta, que pode ser prejudicial pela possível contaminação por cobre, e sem usar abertura de raiz, a qual dificulta e demora o posicionamento dos tubos no momento da soldagem.

Neste sentido, como objetivos específicos, este trabalho pretende:

- Analisar, entender e solucionar os possíveis problemas na realização do passe de raiz em juntas do tipo chanfro estreito em chapas planas e nas três posições críticas de soldagem, plana, vertical e sobrecabeça com os processos de soldagem por curto circuito derivativo e convencional;
- Desenvolver o equipamento denominado: Simulador de Soldagem de Dutos por Retificação (SSDR);
- Apresentar uma metodologia com a qual se possa determinar a espessura do nariz, com um determinado conjunto de parâmetros de soldagem, para poder realizar o passe de raiz sem precisar usar cobre-junta nem abertura de raiz;
- Realizar processos de simulação física de soldagem circunferencial de passe de raiz, pela parte externa do tubo, usando chapas planas com chanfro estreito em soldagem de topo e sem cobre-junta nem abertura de raiz.

- Realizar a soldagem circunferencial, aplicando-se os resultados obtidos nos itens anteriores, validando com isto a metodologia proposta e os equipamentos desenvolvidos neste trabalho.

Todas as soldas realizadas serão de passe de raiz, com as tecnologias MIG/MAG por curto-circuito convencional e os derivativos: STT (*Surface Tension Transfer*), RMD (*Regulated Metal Deposition*) e CMT (*Cold Metal Transfer*). Em todas as etapas, ensaios de macrografia foram realizados, verificando uma penetração total no passe de raiz, assim como a ausência de defeitos.

1.2 – ESTRUTURA DO TRABALHO

Para se alcançar os objetivos propostos, este trabalho foi estruturado em 6 capítulos que abordam os seguintes assuntos:

- Capítulo 1 – Introdução
Aborda a relevância do tema escolhido, os objetivos pretendidos e as contribuições que serão atingidas mostrando para isto uma estrutura do trabalho.
- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica
Discorre-se aqui dos conceitos principais relativos ao trabalho. Faz-se uma abordagem dos aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), do processo de soldagem MIG/MAG com alguns tipos de transferência utilizados no passe de raiz como: transferência por curto circuito convencional e os de transferência por curto circuito derivativo (STT, CMT e RMD). Assim também, aborda-se sobre as juntas de chanfro estreito, o passe de raiz, soldagem de tubos e do planejamento experimental utilizado como ferramenta para o desenvolvimento deste trabalho.
- Capítulo 3 – Desenvolvimento de equipamentos e proposta de metodologia.
Apresenta-se neste capítulo a concepção e construção de equipamentos e de uma metodologia que foram usados durante a realização deste trabalho, para realizar os ensaios ou testes e assim atingir os objetivos.

➤ Capítulo 4 – Metodologia Experimental

Neste capítulo é descrita a forma ou a metodologia como foi realizado este trabalho, usando os equipamentos referidos no capítulo 3. Para isto, dentro deste capítulo foram consideradas 4 etapas de testes, como detalhadas a seguir:

- **1ª etapa:** Foram realizados testes de parametrização, usando-se chapas de aço ABNT 1020, com 6,3 mm de espessura em junta com cobre-junta, com o intuito de encontrar os parâmetros apropriados para realizar a soldagem de passe de raiz na posição plana, vertical no sentido descendente e sobrecabeça, que apresente um cordão com boas características visuais e sem defeitos internos.
- **2ª etapa:** Utilizando-se a “Metodologia do chanfro com nariz inclinado”, e com os parâmetros de soldagem apropriados encontrados na 1ª etapa, foram determinadas as espessuras do nariz, para cada processo de soldagem, que posteriormente foram validados em juntas construídas com essas espessuras de nariz, ideais para realização de passe de raiz sem usar cobre-junta, nas mesmas três posições e usando-se chapas de 10 mm de espessura.
- **3ª etapa:** Usando-se o SDR, foram realizadas simulações físicas de soldagem circunferencial, considerando um tubo de 8” de diâmetro, em chapas de 10 mm de espessura em juntas com e sem cobre-junta.
- **4ª etapa:** Finalmente é realizada a soldagem circunferencial convencional em tubos API 5L-X65 com 8” de diâmetro nominal e 8 mm de espessura de parede, usando-se, na configuração da junta, a espessura do nariz encontrado para cada processo.
Para melhor elaboração e entendimento, estas 4 etapas são representadas no fluxograma de desenvolvimento do trabalho na Fig. 1.1.

➤ Capítulo 5 – Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos dos experimentos, além das discussões acerca dos mesmos. Os resultados são apresentados segundo o fluxograma apresentado na Fig. 1.1, e em sequencia, para cada um dos processos de soldagem utilizado,

➤ Capítulo 6 – Conclusões e trabalhos futuros

As conclusões finais do trabalho são aqui apresentadas assim como também algumas sugestões para futuros trabalhos.

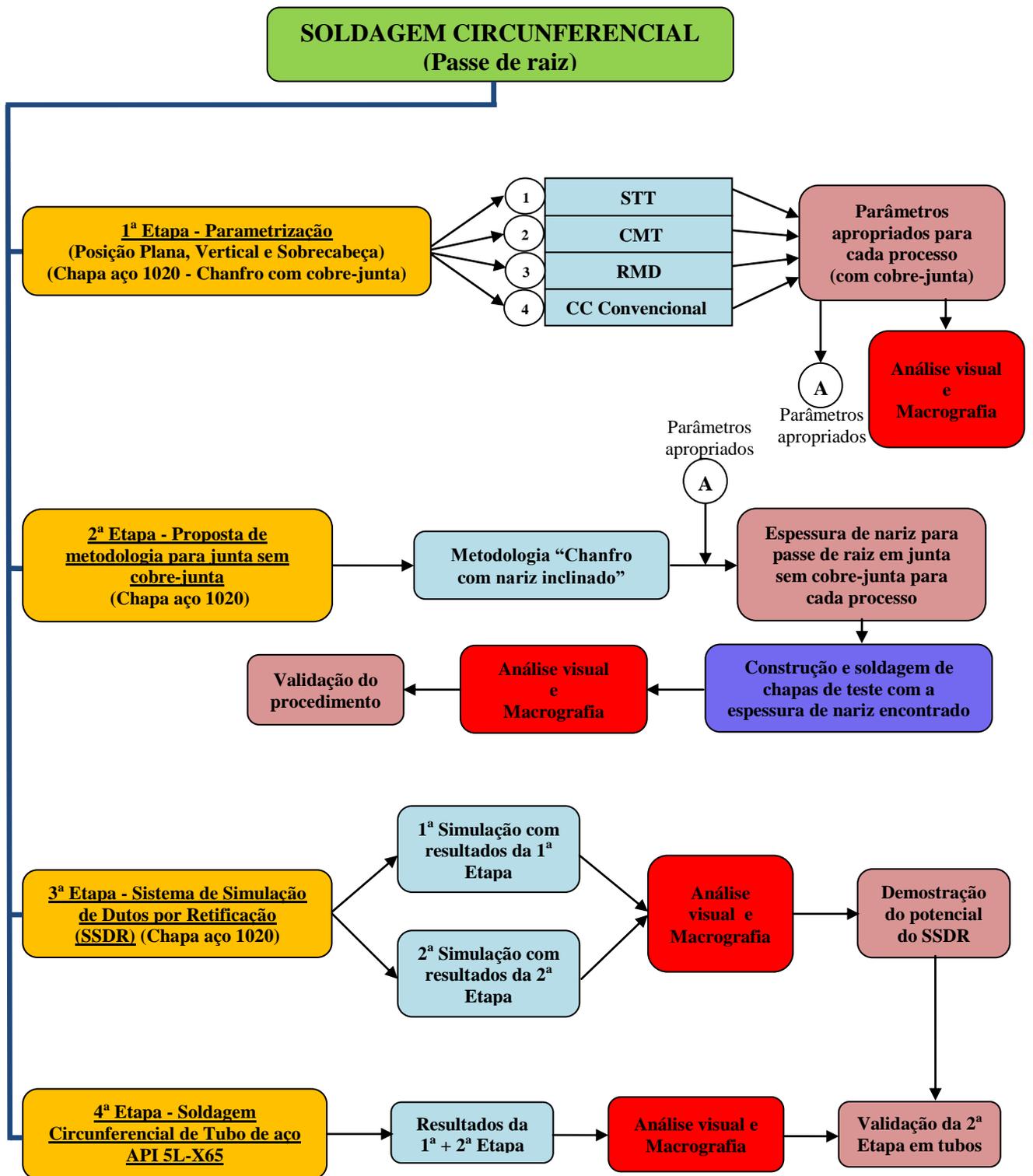


Figura 1.1 – Fluxograma de desenvolvimento do trabalho

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é abordada a fundamentação teórica dos aços de alta resistência baixa liga (ARBL), regulamentados segundo a norma API 5L – Specification for Line Pipe (2000), dos processos de soldagem denominados de curto circuito derivativo, e da união de tubos ou soldagem circunferencial, especificamente do passe de raiz. Com isto é apresentado um levantamento bibliográfico sobre as técnicas ou metodologias usadas para a união de tubos e os problemas na realização de um bom passe de raiz durante a união dos mesmos.

2.1 – AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL)

Aços de alta resistência e baixa liga têm sido usados na construção em grande escala de estruturas soldadas. A principal vantagem desses aços é a combinação de resistência e tenacidade, mas também sua boa soldabilidade. Em geral, esses aços permitem o uso de tubos de paredes mais finas com altas pressões de operação, diminuindo de forma significativa o custo de fabricação de linhas de tubulação.

Com a crescente demanda por gás natural e petróleo no Brasil e com os objetivos de aumentar a eficiência operacional e reduzir custos, é interessante a utilização destes tipos de aço na fabricação de linhas dutoviárias como uma maneira eficaz para a operação a altas pressões e vazões com menor peso e menores custos construtivos. Entretanto, apesar da crescente utilização em outros países de aços ARBL com elevado grau e resistência mecânica (API 5L X100 e X120), estes ainda não são aplicados no Brasil, devido principalmente a falta de viabilidade de produção.

2.1.1 – Evolução metalúrgica dos aços ARBL para tubos

A Fig. 2.1, mostra a evolução metalúrgica ocorrida nos processos de laminação e tratamento térmico de chapas grossas de aço usadas para a fabricação de tubos soldados para transporte de petróleo e seus derivados. A partir dela pode-se observar que desde a década de 60 já eram produzidas chapas de aço para a produção de tubos API 5L-X60 apresentando teor de carbono relativamente alto (0,20%) e contendo também Vanádio para aumentar sua resistência

mecânica. O processo de laminação a quente dessas chapas tinha como objetivo somente obter as dimensões necessárias para a chapa, cujas propriedades mecânicas eram definidas posteriormente, ao se aplicar tratamento térmico de normalização. O teor relativamente alto de carbono não favorece a soldagem do material, particularmente durante a construção do duto, onde esse processo é efetuado no campo.

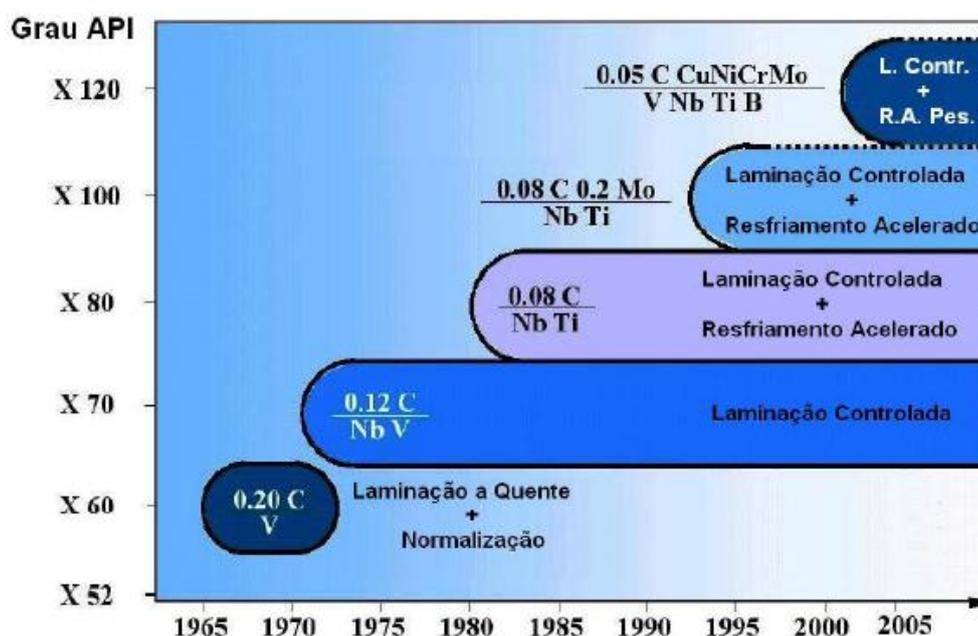


Figura 2.1 – Evolução dos aços usados na fabricação de tubos com grande diâmetro para transporte de óleo e gás (Gorni, et al., 2009)

Ainda na década de 60, pesquisadores ingleses começaram a estudar um novo conceito de material, os aços microligados de alta resistência e baixa liga (ARBL), contendo teores muito pequenos de nióbio, titânio e/ou vanádio, que apresentam uma característica muito peculiar durante sua conformação a quente. Como se sabe, os aços convencionais submetidos a este processo se recristalizam de forma rápida e completa após cada passe de deformação. Isso também ocorre no caso dos aços microligados, mas somente até certo ponto, abaixo de uma dada temperatura, denominada Temperatura de Não-Recristalização, parte dos elementos microligantes se precipitam na austenita. Esses precipitados ancoram os contornos de recristalização paralisando, virtualmente, a restauração do material após cada passe de deformação na laminação, promovendo uma microestrutura final mais refinada. Só o refino de

grão microestrutural leva à elevação simultânea da resistência mecânica e da tenacidade da chapa que dará origem ao tubo (Gorni, et al.,2006).

O endurecimento proporcionado pelo refino de grão também é complementado por outros fenômenos metalúrgicos. Os elementos microligantes ainda em solução também podem se precipitar simultaneamente com a transformação da austenita em ferrita durante o resfriamento da chapa, aumentando mais sua resistência mecânica, ainda que comprometendo um pouco a tenacidade do material. A união desses mecanismos de endurecimento permite reduzir os teores de carbono e demais elementos de liga sem que haja prejuízo para as propriedades mecânicas da chapa, o que contribui para melhorar sua soldabilidade (Gorni, et al., 2009).

Assim, o fato de a laminação definir as propriedades finais do produto impõe que seus parâmetros de processo devam neste caso ser controlados com muito mais rigor do que anteriormente, uma vez que é necessário aplicar os passes de laminação em forma coordenada com a evolução da temperatura de laminado, ou seja, tem-se neste caso um tratamento termomecânico, mais conhecido com Laminação Controlada. Esta rota de fabricação foi viabilizada industrialmente a partir da década de 70, conforme se pode observar na Fig. 2.1, obtendo-se chapas com maior resistência mecânica, API 5L-X70, a partir de aços microligados ao NbV contendo 0,12% de C (Gorni, et al., 2009).

A contínua busca por aços com níveis ainda mais elevados de resistência mecânica e tenacidade, mas teores ainda menores de carbono e elementos de liga, levaram a pesquisas sobre novas abordagens para se refinar ainda mais o tamanho de grãos. Uma das maneiras de se alcançar esse objetivo consiste em se promover a transformação da austenita sob menores temperaturas o que faz com que a nucleação da ferrita aconteça em toda a área dos grãos austeníticos prévios, e não somente em suas bandas de deformação e contorno de grão, como é o caso da laminação controlada convencional. Isso leva a microestruturas ainda mais refinadas com maior resistência mecânica e tenacidade. Isto é conseguido utilizando jatos de água como meio de resfriamento. Esse novo processo viabilizou a fabricação de chapas grossas para a fabricação de tubos API 5L-X80 usando aços com teores de C ainda menores, da ordem de 0,08%, no início da década de 1980, conforme mostrado na Fig. 2.1 (Gorni, et al., 2009).

Essa mesma figura também mostra que a contínua evolução dos projetos de ligas ocorrida desde então viabilizou o surgimento do aço X100 em meados da década de 1990. O aperfeiçoamento dos sistemas de resfriamento acelerado, que elevou as taxas de resfriamento possíveis e viabilizou a execução de têmpera direta após a laminação, permitiu que o grau X120 fosse alcançado no início do novo milênio.

Assim, com o advento dos novos métodos de fabricação dos aços que combinam tratamento térmico, tratamento mecânico, processamento termomecânico (TMCP), entre outros, é possível atingir um balanço entre resistência e tenacidade na microestrutura. O grande desafio então é a soldagem desses aços.

Tubos produzidos a partir de chapas frequentemente utilizam o processo de fabricação denominado de UOE. Neste processo de fabricação, as chapas são inicialmente conformadas à frio para um formato de U, a continuação para o formato O, onde as paredes laterais são fechadas e um chanfro longitudinal é formado. A etapa de ponteamto das faces é realizada a seguir para evitar alterações de diâmetro durante o processo de soldagem. A soldagem final é realizada pelo processo de arco submerso (SAW), sendo o primeiro o passe interno e o segundo o passe externo. Após isto, o tubo é submetido a uma expansão (E) pela aplicação de pressão interna, cuja finalidade é ajustar o diâmetro às normas API 5L.

2.2 – PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG

É um processo de soldagem por fusão, cuja fonte de calor é um arco elétrico mantido entre um eletrodo maciço nu consumível, continuamente alimentado e a peça a soldar. A poça de fusão é protegida por um gás, ou mistura de gases, que evita a contaminação da região de soldagem do meio ambiente. Quando se usa um gás inerte como proteção o processo ainda pode receber a denominação de MIG (*Metal Inert Gas*) e MAG (*Metal Ative Gas*) quando o gás de proteção é ativo ou reativo (Machado, 1996). Em ambos os processos, geralmente o metal de adição possui uma composição química em conformidade ao metal de base. É um dos processos mais utilizados na indústria devido a sua capacidade de produção originada pela alimentação contínua do arame, que permite alto fator de trabalho, e o uso de uma alta densidade de corrente, que proporciona alta taxa de fusão.

Um dos aspectos restritivos do processo MIG/MAG relacionados com a regulagem dos parâmetros estão ligados a sua inter-relação (Scotti e Ponomarev, 2008). Existem no mercado várias soluções de equipamentos que diminuem a influência do soldador/operador na regulagem das variáveis, operando a partir de controles eletrônicos, de forma a regular/ajustar os parâmetros automaticamente. Estes equipamentos, normalmente denominados sinérgicos, alcançam a estabilidade operacional da transferência metálica. Porém, tal facilidade tem um custo (estes equipamentos são mais onerosos do que os ditos convencionais – fontes convencionais ou eletrônicas sem monitoramento e controle do arco). É nesta característica que reside a importância da disseminação de metodologia que auxiliem os operadores na correta regulagem manual do processo (Souza, 2010).

Com relação aos modos de transferência metálica, Modenesi (2000) assegura que diversos aspectos operacionais de soldagem são influenciados pela forma com a qual o metal fundido se transfere do eletrodo para a poça de fusão, em particular, a capacidade da soldagem em várias posições, o formato do cordão, o nível de respingos e fumos, como também a estabilidade e o desempenho operacional do processo.

Estes modos de transferência metálica dependem dos ajustes das variáveis operacionais, tais como: corrente, tensão, polaridade, diâmetro e composição do eletrodo utilizado, gás de proteção, comprimento energizado do eletrodo, do modo como as forças atuantes no processo interagem, entre outros. Assim, as transferências são divididas em transferência por curto circuito e vôo livre. Esta última se subdivide ainda em seis diferentes modos, conforme a particularidade da formação e destacamento das gotas, a saber: Globular, Globular repelida, Globular repulsiva, Goticular ou Goticular projetada, Goticular com alongamento, Goticular rotacional e Explosiva (Scotti e Ponomarev, 2008). As classes e os respectivos modos de transferência estão relacionando com parâmetros de regulagem do processo e tipos de gases de proteção.

2.2.1 – Transferência por Curto Circuito Convencional

Na transferência por curto circuito, a gota de metal líquido em crescimento, formada na ponta do eletrodo, atinge periodicamente a poça de fusão, ocasionando um curto-circuito elétrico e a

extinção momentânea do arco. A transferência por curto-circuito ocorre geralmente em correntes e tensões de soldagem baixas (baixa força eletromagnética, permitindo um grande diâmetro crítico da gota, e arcos curtos o suficiente para que a gota toque a poça antes de se destacar). A frequência de transferência de curtos-circuitos varia de 20 a 200 vezes por segundo (Scotti e Ponomarev, 2008). A Fig. 2.2 mostra os oscilogramas de tensão e corrente para uma transferência típica por curto circuito. Nesse gráfico pode-se perceber que a tensão cai bruscamente quando a gota toca a poça (início do curto circuito) e permanece baixa até o fim do curto, enquanto a corrente (denominada de corrente de curto-circuito) aumenta rapidamente, decaindo apenas após o destacamento da gota.

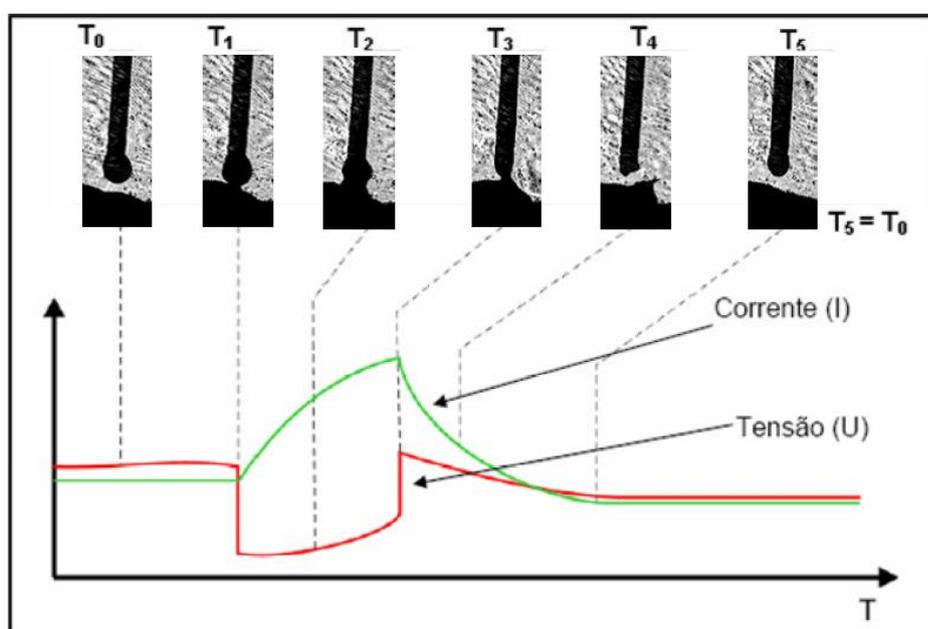


Figura 2.2 – Oscilograma de um ciclo completo de transferência por curto-circuito (modificado de Gomes, 2006)

A principal força agindo sobre a gota durante a transferência por curto-circuito decorre da tensão superficial. Mas não se pode esquecer-se do efeito *Pinch*, que pode atuar contra ou a favor da transferência (Scotti e Ponomarev, 2008).

A transferência por curto-circuito é de natureza aleatória, a qual se reflete na variabilidade da duração do curto-circuito e do tempo de arco aberto (ou do tempo entre curtos-circuitos). Devido aos valores baixos de corrente e de tensão durante a fase arco aberto, assim como o fato de que durante parte do processo o arco tende a se apagar, o calor transferido para a peça

é reduzido. Esta característica torna a soldagem por curtos-circuitos muito adequada para chapas finas e soldagem fora da posição plana. Em contrapartida, no caso de soldagem de chapas grossas, pode ocorrer falta de fusão e mordeduras (Scotti e Ponomarev, 2008).

2.2.2 –Transferência por Curto Circuito Derivativo

Uma das maiores inovações apresentadas nos últimos anos como forma de aperfeiçoamento do processo MIG/MAG tem sido o controle da transferência metálica. Entende-se aqui este controle como o domínio do sinal de corrente, de uma forma imposta e cíclica, visando a otimização das características favoráveis. Ou seja, não se procura com os diferentes métodos de controle da transferência metálica a substituição dos métodos tradicionais (neste caso por curto circuito convencional) e sim suas adequabilidades para quando exigências especiais justificam um investimento maior em termos tecnológicos. As finalidades para tal controle podem ser as mais variadas, isoladamente ou em conjunto, como a de garantir uma transferência metálica mais uniforme, uma poça de fusão de pequeno volume e mais estável termicamente (facilitando a soldagem de passes de raiz ou de chapas finas) e uma relação penetração/taxa de deposição controlada (Scotti e Ponomarev, 2008).

De forma geral, o controle se baseia em: obtenção de maior regularidade na transferência metálica, redução de respingos e fumos e obtenção de características geométricas e metalúrgicas homogêneas. Também as formas de onda adotadas são similares: manutenção da corrente em baixo nível no momento do contato entre a gota fundida e a poça de fusão, com a finalidade de se reduzir o nível de respingos e se formar uma ponte líquida estável, seguindo-se um pulso de corrente que causa a estricção desta ponte, propiciando a transferência definitiva da gota e, novamente visando-se um baixo nível de respingos e fumos, reduz-se a corrente na iminência do desprendimento. Após isto, um segundo surto de corrente, o qual tem como função a fusão da ponta do arame-eletrodo para formação da próxima gota metálica. A partir daí, e, aproveitando-se das possibilidades de controle hoje disponíveis, os sistemas se tornam mais eficientes e surgem novas funções, como o controle da penetração e controle do aporte térmico (Silva, et al., 2007).

A principal diferença destes processos com o tradicional MIG/MAG Curto Circuito Convencional é o controle da corrente de soldagem independente da velocidade de

alimentação do arame. Assim a tradicional explosão quando o início e o final do curto acontecem é quase ou totalmente eliminado. Isto reduz a agitação na poça de soldagem, respingos e fumos providenciando um melhor controle da poça e da penetração (Silva, et al., 2007). Com o desenvolvimento destas novas tecnologias se atinge alta produtividade e baixo aporte térmico, combinado com baixo respingo e alta estabilidade do arco

Com isto, se poderiam denominar estes novos processos de Processos de Soldagem por Curto Circuito Derivativo e entre eles podem-se citar as tecnologias STT, CMT e RMD, assim, estes processos serão utilizados neste trabalho¹, toda vez que são apropriados para realização de passe de raiz.

2.2.2.1 – Processo de soldagem STT

O processo de soldagem STT desenvolvido pela empresa Lincoln Electric, foi o primeiro sistema comercial que utilizou o princípio de controle do curto circuito. Para isto, utiliza uma fonte com um inversor de alta frequência e um avançado controle do formato da onda para produzir soldas de alta qualidade o que também significa reduzir fumos e respingos. Isto elimina problemas de falta de fusão e excessivo aporte térmico, oferecendo maior conforto ao soldador (Stava, 2009). Então, a fonte do processo STT não opera no modo de corrente constante nem de tensão constante (Stava, 1993). Segundo Nicholson (2003), a corrente fornecida pela fonte do STT é guiada pelo estado da tensão do arco.

O processo STT ganhou aceitação na soldagem de tubos devido à alta qualidade do passe de raiz que produz. O menor respingo gerado minimiza o tempo gasto na limpeza da superfície a ser soldada e permite maior tempo de soldagem antes que o bocal da tocha deva ser limpo devido ao acúmulo de respingos. Assim, usando-se um adequado equipamento de soldagem mecanizada, este processo pode ser usado também para enchimento e acabamento (Stava, 2009). Pumphrey (1998) destaca ainda que o STT está limitado para aplicações apropriadas para transferência por curto-circuito.

¹ Como forma de simplificar a comunicação escrita, neste trabalho será utilizada a nomenclatura processo STT, CMT, RMD ao invés de processo MIG/MAG com tecnologias STT, CMT e RMD.

A Fig. 2.3 apresenta os oscilogramas de corrente e tensão de um ciclo de transferência no funcionamento do processo STT mostrando os patamares das etapas desde a formação até o destacamento da gota. Assim:

- **(a) Corrente de Base:** Entre os curtos circuitos (dentro do período de arco aberto), a corrente de base é mantida em um valor relativamente baixo (valor inserido na fonte), a qual mantém o arco aberto, continuando com a formação da gota e contribuindo com o aquecimento do metal de base.
- **(b) Curto inicial:** Assim, quando a gota está perto de tocar a poça de fusão, o sensor de “tensão do arco” detecta que o início do curto circuito vai acontecer e a corrente é reduzida para a mínima necessária para o contato gota/poça de fusão. Esta corrente promove o “molhamento” da gota ao invés de sua expulsão explosiva.
- **(c) Corrente de estrangulamento (Pinch):** Elevada corrente é aplicada imediatamente após o curto circuito inicial causando o derretimento e destacamento da gota na ponta do arame. A fonte STT eletronicamente calcula quando a separação da gota vai ocorrer e reduz rapidamente a corrente antes da separação do arame eliminando o respingo.
- **(d) Segunda redução da corrente:** O processo reestabelece o arco a um nível de corrente baixo para evitar a natureza explosiva da transferência curto-circuito convencional.
- **(e) Corrente de Pico:** Uma elevada corrente é aplicada imediatamente após o restabelecimento do arco. A ponta do eletrodo se funde rapidamente criando uma nova gota. Simultaneamente, as forças do jato do arco, que atuam em direção da poça de fusão, comprimem a sua superfície ajustando o comprimento do arco, evitando a ocorrência de curtos acidentais, e produzindo alto aquecimento do metal de base, assegurando excelente fusão.
- **(f) Corrente de Cauda (Tail Out):** Finalmente, perante um formato exponencial de corrente, o Tail Out controla o ajuste da faixa em que a corrente é mudada do valor de pico até o valor de base. Basicamente o Tail Out é um controle de aporte térmico grosseiro.

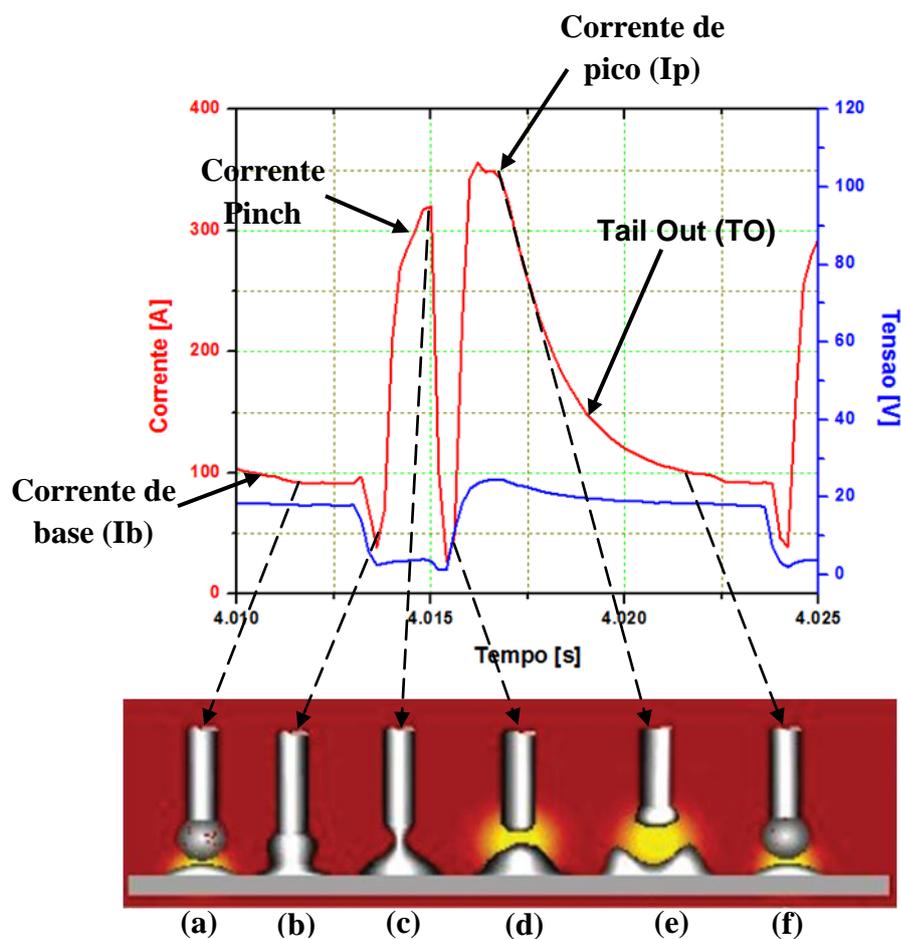


Figura 2.3 – Oscilogramas de corrente e tensão para o processo STT, relacionados com gráficos das etapas de transferência (modificado de Lincoln, 2010c)

Assim, a corrente de base (I_b) é responsável pelo aquecimento do eletrodo e do metal de base garantindo a formação e manutenção da gota formada na ponta do eletrodo e pela fluidez da poça de fusão (Lincoln, 2010a). Segundo Stava (1993), usando $Ar+25\%CO_2$, a faixa operacional da corrente de base está entre 50 e 100 A, já utilizando 100% CO_2 , o nível de corrente é cerca de 50% menor. Scotti e Ponomarev (2008) adicionam que a corrente de base não deve exceder de 70 A quando do uso de CO_2 puro, caso contrário, aumenta-se significativamente a geração de respingos, devido a fragmentação da gota repelida.

A corrente de pico (I_p) é utilizada para reabertura do arco e para a fusão do eletrodo na formação da nova gota (Silva, et al. 2008). Segundo Scotti e Ponomarev (2008), as forças do jato do arco comprimem a superfície da poça de fusão, aumentando o comprimento do arco e,

pode-se adicionar também, espalhando a poça de fusão, evitando contatos prematuros desta com a gota em formação.

O Tail-Out (TO), ou rampa de descida, é a forma ou rapidez com que a corrente de pico decresce ou diminui até o valor da corrente de base. O TO tem um valor adimensional de regulação de 0 a 10, reguláveis na máquina, que fazem com que este parâmetro aporte maior ou menor calor à poça de fusão. Assim, reduz agitação da poça de fusão provocada pela reabertura do arco, pela corrente de pico e exerce influência na frequência do curto-circuito (Kvasov, 2000). A Fig. 2.4 mostra a representação gráfica da regulação dos valores do TO.

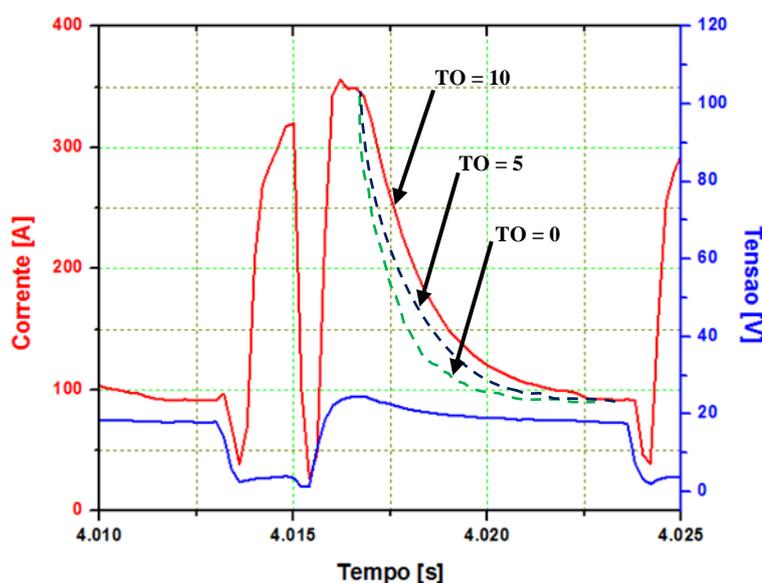


Figura 2.4 – Representação gráfica da regulação dos valores do TO no oscilograma de corrente do processo STT

Ainda com respeito aos parâmetros reguláveis deste processo, segundo o fabricante a I_p tem influência sobre a face da raiz e a I_b sobre o reforço da raiz (ou penetração), como mostrados na Fig. 2.5.

Diferente do processo MIG/MAG convencional, a tecnologia STT tem a habilidade de controlar o aporte térmico para a poça de fusão independente da velocidade de alimentação do arame. Isto permite ao operador ajustar o aporte térmico para atingir o desejado perfil do passe de raiz. Isto pode ser percebido na Fig. 2.4, onde para um mesmo valor de alimentação de arame (4,5 m/min) a corrente media pode ser ajustada mudando-se os valores, neste caso,

do TO, de 0 a 10, fazendo-se com isto um ajuste do aporte térmico. Este ajuste também pode ser realizado mudando-se os valores de I_p e I_b .

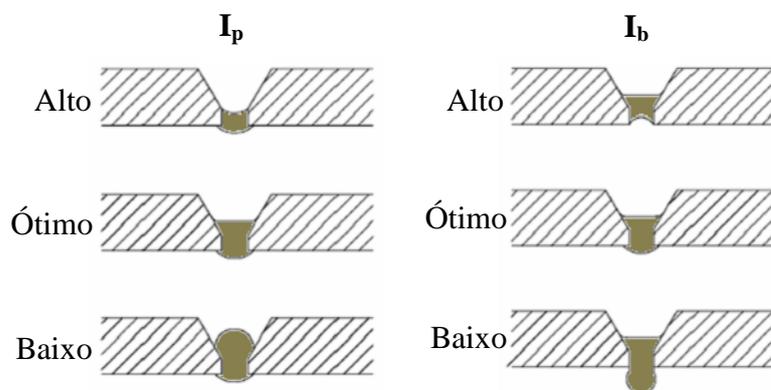


Figura 2.5 – Gráficos dos formatos da face e raiz, do cordão de passe de raiz, influenciados pelos parâmetros I_p e I_b respectivamente (modificado de Lincoln, 2010b)

A tecnologia STT permite a soldagem de aços inoxidáveis e as suas ligas assim como aços de alta resistência. Na soldagem de aços comuns permite o uso de 100% CO_2 como gás de proteção produzindo uma solda com baixo hidrogênio. Em aço inoxidável, diferentes gases podem ser utilizados, incluindo mistura de Argônio e Hélio (Stava, 2009).

Segundo Pumphrey (1998), com a tecnologia STT os respingos podem diminuir em 90% e a geração de fumos em 50%, comparado com a transferência por curto-circuito convencional. Igualmente, Srinivasan e Balasubramanian (2010), determinaram uma diminuição de 40% - 50% na geração de fumos usando STT.

2.2.2.2 – Processo de soldagem RMD

O processo RMD (*Regulated Metal Deposition*) é outro processo de transferência por curto-circuito derivativo, que usa o princípio de funcionamento do curto circuito controlado. Desenvolvido pela empresa Miller Electric, foi patentado em 2004 (Miller, 2010).

Um controle preciso da transferência por curto-circuito provê uma poça de fusão menos agitada e um arco mais estável. Isto providencia menos chance de falta de fusão, menos respingos e uma alta qualidade do passe de raiz quando na soldagem de tubos.

A estabilidade do processo de soldagem diminui a manipulação da poça, requerida pelo soldador, e é mais apropriada para desalinhamentos ou “*high-low*” (geralmente chamado de *Hi-Lo*). O perfil do cordão de solda é mais espesso que soldas convencionais de passe de raiz o que pode eliminar a necessidade do passe quente, melhorando a produtividade e reduzindo custos em soldagem. O RMD diminui o aporte térmico em 5 a 20% quando comparado com o curto-circuito convencional, minimizando com isto os respingos (Miller, 2009).

A Fig. 2.6 mostra o oscilograma de um pulso de corrente e os 7 estágios que acontecem desde a formação da gota até o destacamento da mesma, fornecido pelo fabricante (Miller, 2009). Assim, estando a gota metálica já formada na ponta do arame-eletrodo, a corrente se mantém em níveis baixos (fase *wet*) até o momento em que ela toca a poça de fusão. Após a gota tocar a poça de fusão, a corrente é elevada rapidamente (fase *pinch*), iniciando a atuação da força eletromagnética no destacamento da gota. Na fase seguinte (*clear*), a corrente continua crescendo, porém, a uma taxa mais moderada, até o momento que o fim do curto-circuito é detectado, ou seja, momento em que ocorre a formação do “pescoço” na interface arame/gota por ação do Efeito *Pinch*. Após a detecção do fim do curto-circuito, a corrente é novamente reduzida (fase *blink*), a fim de restabelecer o arco elétrico de maneira suave e não promover agitação da poça de fusão. Restabelecido o arco elétrico, a corrente é novamente elevada (fase *ball*), proporcionando a formação de uma nova gota metálica na ponta do arame-eletrodo. Nas fases seguintes (*background* e *preshort*), a corrente é novamente reduzida para permitir o contato da nova gota com a poça de fusão. Essa redução de corrente também garante que a força do arco elétrico não promova agitação na poça de fusão.

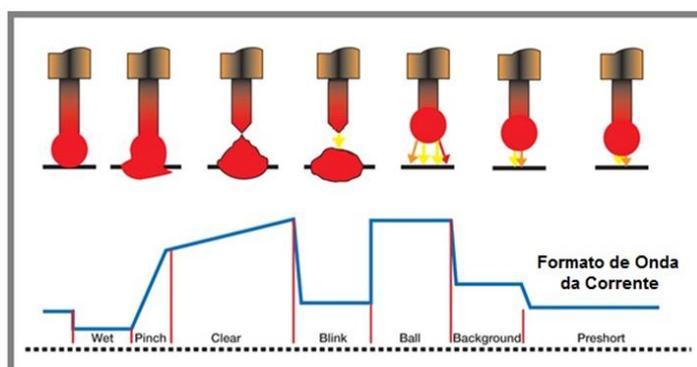


Figura 2.6 – Oscilograma da corrente para o processo RMD, mostrando os 7 estágios de transferência (modificado de Miller, 2009)

Igualmente, a Fig. 2.7, mostra também um oscilograma do RMD, mas adquirido com o sistema de aquisição do Laprosolda-UFU.

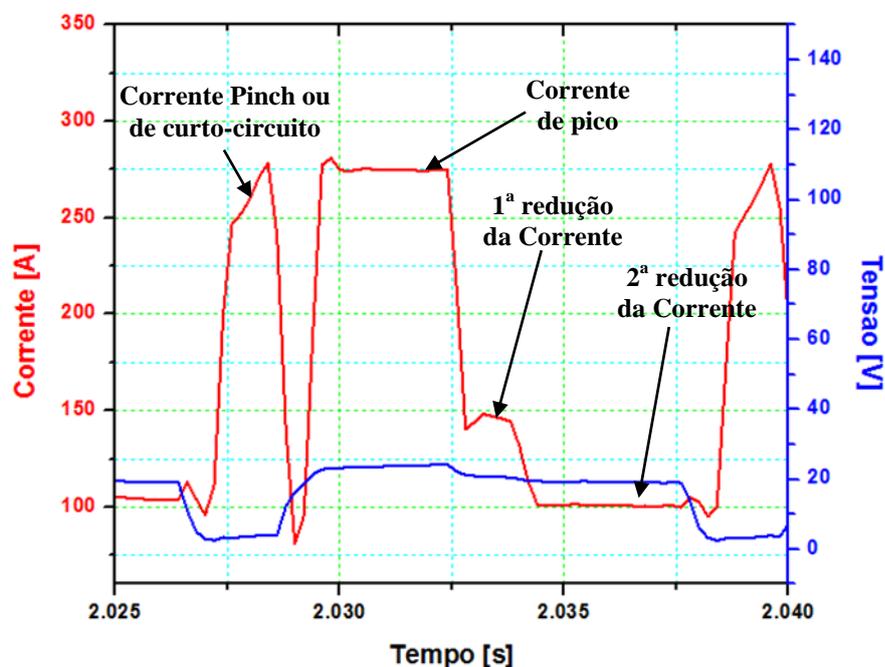


Figura 2.7 – Oscilograma da corrente e tensão do processo RMD

Da Fig. 2.3 e Fig. 2.7 pode-se ver que os oscilogramas de corrente de ambas as tecnologias, STT e RMD, respectivamente, são similares. A diferença entre elas radica principalmente na mudança ou passagem do valor da corrente de pico para a corrente de base, até o destacamento da gota. Neste caso, no oscilograma da tecnologia STT, esta passagem se realiza em formato exponencial, regulado na fonte, chamado de Tail Out (TO). Já no oscilograma do RMD, esta passagem se realiza de forma rápida até um patamar médio onde se mantém por alguns milisegundos e posteriormente desce novamente a um patamar menor no qual se mantém até a gota estar próxima de curto-circuitar sendo este terceiro patamar onde a gota toca a poça de fusão. Estes patamares são automaticamente regulados pela fonte.

2.2.2.3 – Processo de soldagem CMT

É outro processo por curto circuito derivativo e foi desenvolvido pela Fronius. Este processo utiliza um novo método para destacamento da gota. Diferentemente do Curto-Circuito Convencional e os outros processos derivativos (STT e RMD), o processo CMT além de

alimentar o arame eletrodo continuamente na direção da poça de fusão é também recuado após o curto ter acontecido, ajudando com isto o destacamento da gota.

O princípio de funcionamento do mecanismo para alimentar e reverter o movimento do arame é composto por dois alimentadores de arame controlados digitalmente. Um alimentador convencional empurra o arame na direção da poça de fusão e o outro alimentador, acoplado à tocha, movimenta o arame para frente e para trás por um servo-motor (Fig. 2.8a). Este movimento de avanço e recuo é realizado numa frequência de até 70 Hz (Markus, 2010). Com o intuito de impedir tensões sobre o arame quando no seu movimento para trás, toda vez que o alimentador convencional continua alimentando o arame, o cabo da tocha possui um “compensador de arame” ou “pulmão” ou *buffer*, que absorve o movimento do arame perante um conduíte flexível posicionado dentro dele (Fig. 2.8b).

Assim, toda vez que ocorre um curto circuito, um processo digital de controle interrompe o suprimento de energia e retrai o arame. O movimento de retração do arame evita os respingos quando o metal se transfere e a baixa corrente de transferência utilizada reduz enormemente a geração de calor do processo, trabalhando com menor energia, o que favorece a utilização na união de chapas finas, tanto por soldagem como por brasagem (Rosado, 2008), além de ser apropriado para o passe de raiz na soldagem de tubos.

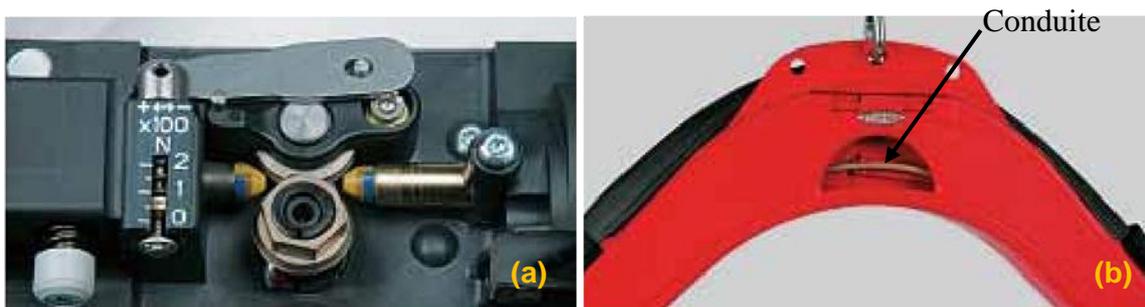


Figura 2.8 – (a) alimentador de arame inserido na tocha e (b) *buffer* ou pulmão mostrando o conduíte flexível

Segundo Chu (2007), a principal aplicação deste processo é a união de aço e alumínio por brasagem, podendo ser aplicado em operações que requerem brasagem isenta de respingos e com deformação baixa de chapas galvanizadas, utilizando arame de solda de cobre-silício,

além de soldagem de chapas finas (0,3 – 0,8 mm) de alumínio, inoxidáveis e magnésio. Neste caso, o baixo aporte de calor do processo permite dispensar o uso de cobre-junta.

Pires et al. (2010) mostraram no seu trabalho que o CMT produz menos quantidade de fumo, que o GMAW, devido ao baixo aporte térmico o que corresponde a menor temperatura do arco e, conseqüentemente menor aquecimento e vaporização. Também, o uso de alta corrente causa instabilidades no arco e conseqüentemente altas emissões de fumo.

A Fig. 2.9 mostra o oscilograma da corrente e tensão do CMT, dados adquiridos no Laprosolda-UFU, apresentando um perfeito controle da corrente em relação a frequência e repetitibilidade.

As variáveis que a fonte permite regular neste processo são denominadas “Comprimento de Arco”, que permite a regulagem do comprimento do arco voltagem desde um valor mínimo de -30 até um valor máximo de +30 (valor adimensional considerado pelo fabricante), e o “Controle Dinâmico” que, segundo o fabricante, influencia na dinâmica do curto-circuito no momento de destacamento da gota e pode exercer diferentes funções sendo o seu ajuste realizado conforme o material de adição e o diâmetro do arame eletrodo utilizado.

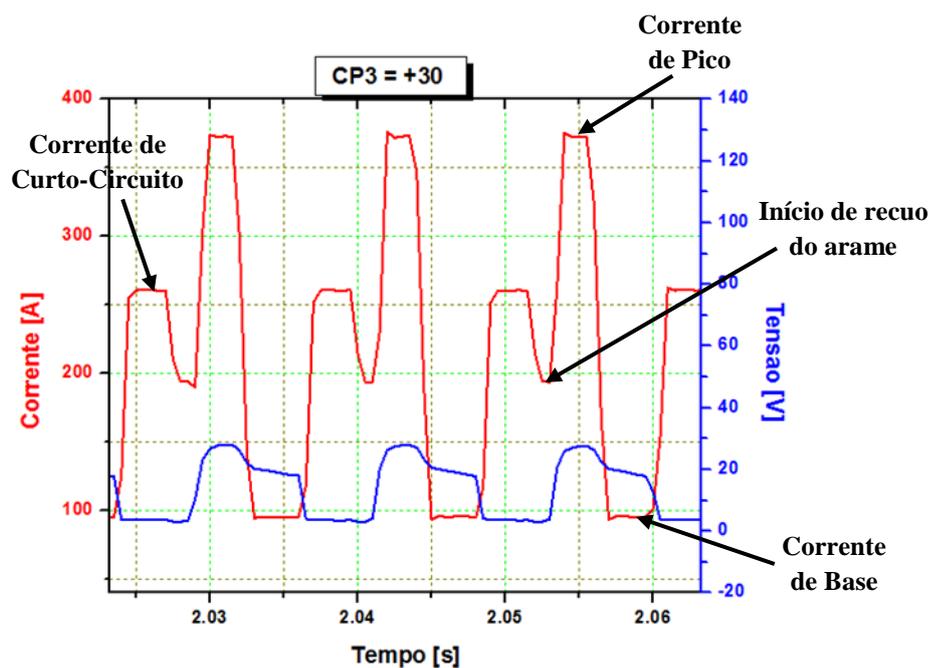


Figura 2.9 – Oscilogramas da corrente e tensão do processo CMT

Dos oscilogramas de corrente e tensão da CMT (Fig. 2.9), pode-se observar que, a corrente se encontra num valor baixo antes de a gota tocar a poça de fusão e se mantém neste patamar, por alguns microsegundos, até o curto-circuito acontecer. Imediatamente, a corrente é aumentada (corrente de curto-circuito ou *pinch*) até um valor próximo do curto-circuito terminar ou se abrir. A corrente então é diminuída para que a ruptura da ponte entre a gota e a poça de fusão aconteça num valor mínimo de corrente, evitando respingo e fumos, mas neste tempo de diminuição da corrente, a fonte manda o motor de passo, posicionado na tocha, recuar o arame forçando a ruptura do curto-circuito e abrindo o arco. Então, a corrente é aumentada rapidamente, formando uma nova gota e o valor da corrente diminui novamente antes do curto acontecer, permanecendo neste patamar até o próximo curto-circuito, repetindo-se o ciclo.

2.3 – JUNTAS DE SOLDAGEM

Juntas, em soldagem, se referem à forma como as partes a serem unidas são configuradas antes de serem soldadas. As juntas comumente utilizadas em estruturas de aço, chamadas de “metal de base”, são basicamente classificadas como: juntas de topo, juntas em T, juntas de canto e juntas superpostas ou sobrepostas, existindo diversas variações para cada caso. No caso das juntas de topo, pode-se subdividir em juntas com penetração total e juntas com penetração parcial. O tipo de junta com penetração total pode ou não utilizar os conhecidos cobre-juntas, que podem ser permanentes ou temporários, quando, respectivamente, integram a junta de topo ou são removidos após a soldagem (Okumura and Taniguchi, 1982).

O formato do chanfro, por sua vez, tem grande influência no comportamento, na eficiência e na confiabilidade da junta de topo, de modo que a seleção de sua geometria deve ser efetuada de acordo com o tipo de aplicação. Muitas vezes, as dimensões e o formato dos chanfros padronizados são ligeiramente modificados, pela experiência do próprio construtor, justamente para adaptar-se ao tipo de aplicação da estrutura soldada e sem que isto acarrete diminuição da qualidade da junta soldada (Okumura and Taniguchi, 1982). A Fig. 2.10, apresenta as partes que conformam uma junta de topo.

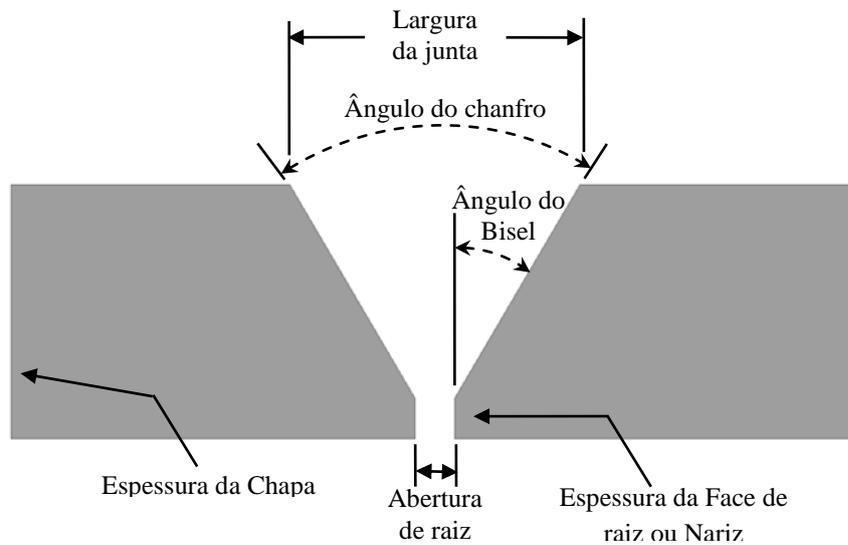


Figura 2.10 – Terminologia usada para descrever as partes que conformam uma junta de topo com chanfro em “V” considerando-se abertura de raiz (modificado de AWS, 1989)

Existem diferentes configurações de chanfros, desde as tradicionais juntas em “V” até as mais desenhadas, todas elas apropriadas às condições de soldagem e ao material a ser soldado. Diminuindo o ângulo do chanfro de uma junta em “V”, levará a um preenchimento com menor número de passes, aumentando assim a produtividade. Na Fig. 2.11, são mostradas algumas das diversas configurações existentes.

Como regra geral, é desejável minimizar o insumo de calor e a quantidade de metal depositado, sem prejuízo da qualidade da junta soldada. Entretanto, para se atingir este objetivo, é necessário empregar alta tecnologia, sem o que será inevitável a ocorrência dos defeitos de soldagem (Okumura and Taniguchi, 1982).

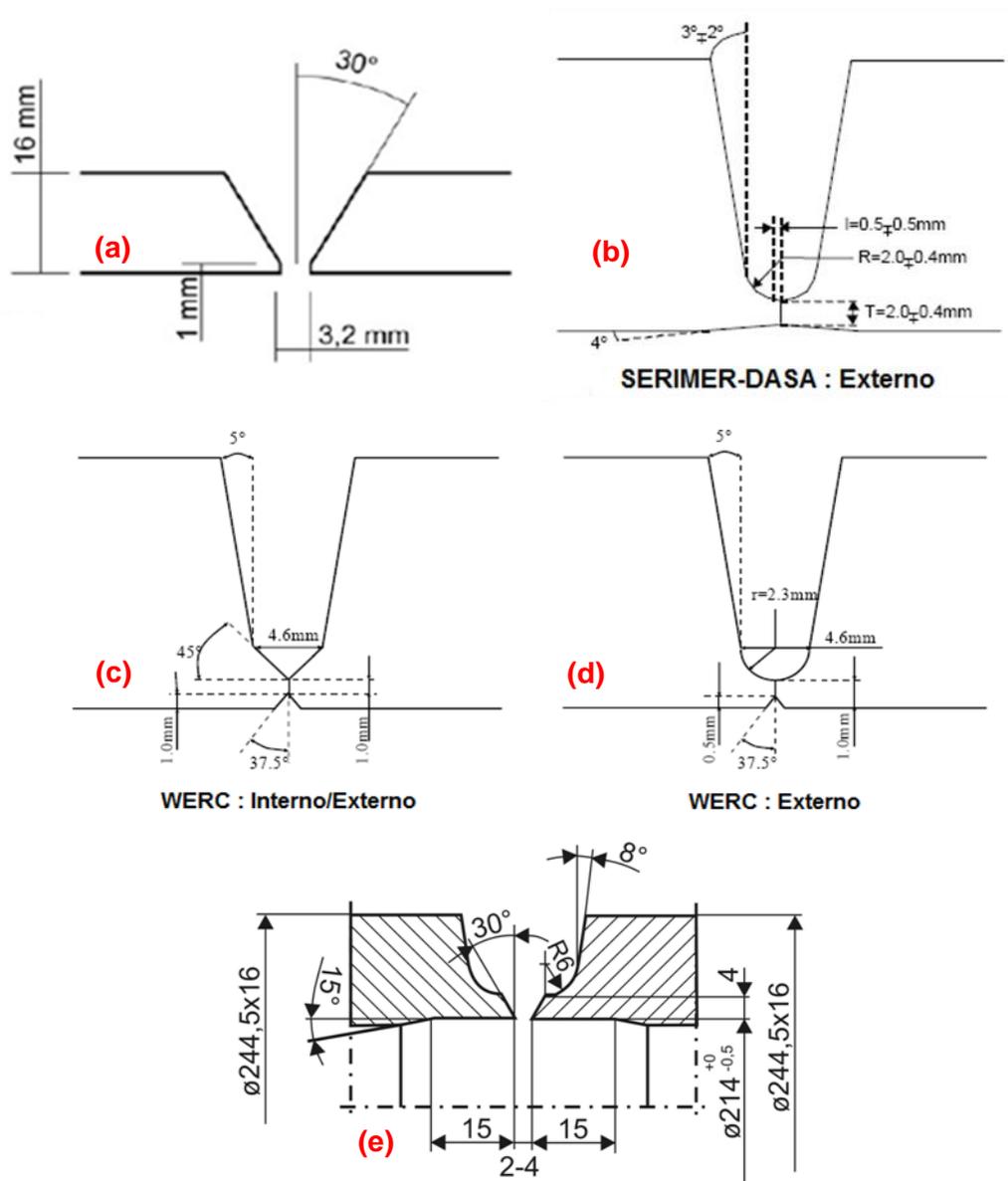


Figura 2.11 – Algumas configurações de juntas: (a) junta em “V” básica, (b), (c) e (d) juntas de chanfro estreito (Hudson, 2004), (e) junta específica (Dander, 2005)

2.3.1 – Juntas de Chanfro estreito

A viabilização da automação, do ponto de vista econômico, requer juntas menos volumosas, tornando-se um fator adicional de dificuldades (Pereira, 2009). Em geral, juntas menos volumosas são atingidas diminuindo o ângulo do chanfro, como mostrado na Fig. 2.12.

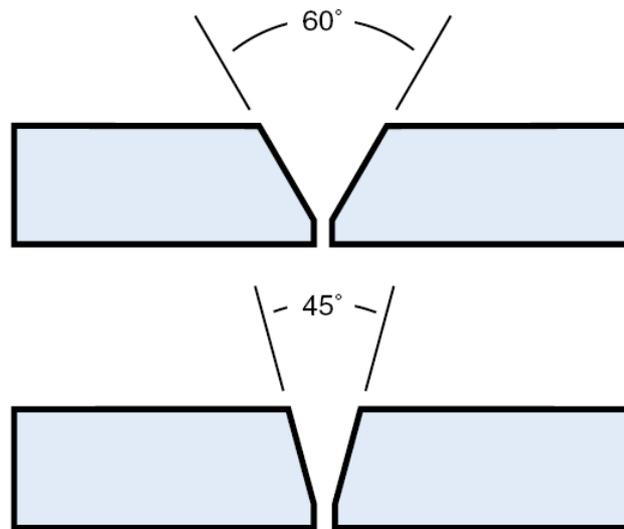


Figura 2.12 – Representação da diminuição do volume de solda a ser depositada quando da diminuição do ângulo do chanfro

As juntas de chanfro estreito (*Narrow Gap Welding* ou *Narrow Groove Welding*) foram desenvolvidas para soldagem seções de chapas grossas de uma forma mais econômica. Este procedimento de soldagem usa juntas preparadas com pequenos ângulos, tipicamente na faixa de 2 – 20°, o qual reduz a quantidade de metal a ser depositado, menor tempo de soldagem para o preenchimento, o que significa menor calor fornecido ao metal de base reduzindo com isto possíveis distorções, além de aumentar a produtividade (TWI, 2010). Por outro lado, segundo Hudson (2004), uma geral definição de chanfro estreito descreve a soldagem dentro de uma junta com paredes paralelas (ângulo nas paredes dos chanfros de 2-10° também são usados) em materiais grossos, i.e., tipicamente de 10 a 200 mm.

Soldagem mecanizada pode melhorar a produtividade, a qualidade da solda e condições de trabalho. Em muitas situações, mecanização pode ser usada para realizar soldas que não são possíveis com o processo manual. Um exemplo disto é a soldagem em chanfro estreito (Weman, 2003). No setor de construção de tubulações, a soldagem de passe de raiz em chanfro estreito é muito importante no termo qualidade e produtividade.

Nos processos de soldagem mecanizada em chanfro estreito, um problema encontrado é a dificuldade de manter o perfil correto do cordão de solda, acarretando em falta de fusão e de penetração, além da existência de irregularidades no formato do cordão. Algumas das razões

para tais defeitos geométricos são simples; por exemplo, a incompatibilidade entre a largura da folga, a velocidade de alimentação e a taxa de fusão que podem fornecer um volume de solda insuficiente para formar uma ligação metálica entre as paredes do chanfro. Porém nem sempre se consegue identificar ou justificar a causa do surgimento de defeitos geométricos. O correto entendimento do mecanismo que governa a regularidade do cordão e a definição dos limites das faixas operacionais promoverão a otimização do processo, minimizando os defeitos (Pereira, 2009).

Pereira (2009) mostrou no seu trabalho, que durante a soldagem, devido a flutuação dos níveis de corrente (pico e base) e à própria geometria do chanfro, a ponta do eletrodo poderia estar mais próxima das paredes do que do fundo do chanfro, em arcos longos, provocando o deslocamento do arco para uma destas paredes, causando um desequilíbrio na transferência metálica e, conseqüentemente, uma alteração na distribuição de calor na junta. Verificou ainda, que existe um volume mínimo de material a ser depositado (a uma alta temperatura) necessário para o preenchimento do chanfro, fazendo com que o cordão se regularize no fundo e não origine desvio das gotas, causado pelo refluxo do plasma, originando a formação irregular do cordão.

Por tanto, a natureza deste processo requer um preciso controle para garantir uma alta qualidade de soldagem. Assim, somente é possível realizar soldagem em chanfro estreito com sistema de soldagem mecanizado ou automatizado. Um pequeno desvio do centro da linha de encosto pode resultar em defeitos de falta de fusão, devido ao arco e poça de fusão serem direcionadas ao lado das paredes do chanfro. Grande atenção deve-se ter com a usinagem do chanfro.

A Fig. 2.13 mostra a área que deve ser preenchida em uma junta de chanfro estreito e em uma junta em “V” convencional, para espessura de parede de 8 mm. Pode-se ver que a junta do tipo chanfro estreito tem uma área menor em $8,9 \text{ mm}^2$, que representa 27,7% a menos de área a ser preenchida.

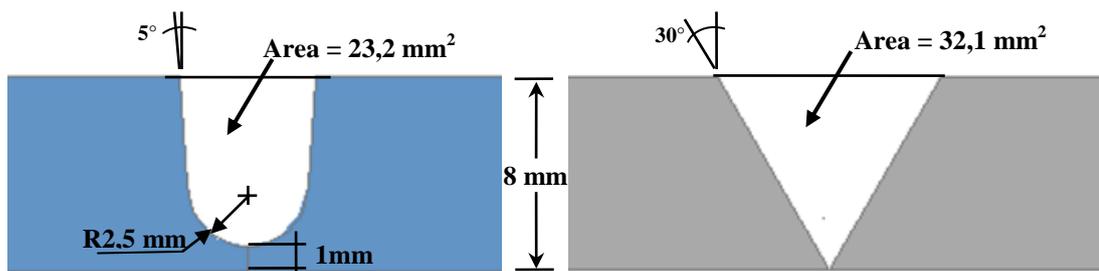


Figura 2.13 – Diferença entre as áreas a serem preenchidas considerando chanfro estreito e chanfro em “V”

2.4 – PASSE DE RAIZ

O passe de raiz é o primeiro passe a ser depositado durante a soldagem circunferencial na união de tubos, seguido do passe de enchimento e passe de acabamento, e é o mais crítico de ser realizado por várias razões:

- É o passe mais difícil de ser depositado, requer um soldador experiente para fazer um bom cordão ao redor da junta do tubo, a qual pode ter variações em medidas e desalinhamentos;
- A velocidade de realização do passe de raiz determina a velocidade com a qual a linha dutoviária é construída, assim, qualquer atraso no passe de raiz atrasa o projeto.
- Qualquer passe de raiz com defeito usualmente requer de um reparo total da espessura da parede da chapa ou tubo (cordões de passe de raiz, enchimento e acabamento), o que origina um custo adicional além do tempo gasto na execução do reparo (Lamond, 2007).

Em campo, no Brasil, o passe de raiz geralmente é depositado manualmente com eletrodo revestido. Um eletrodo celulósico numa soldagem vertical descendente é o método mais popular e oferece uma maior velocidade de soldagem, sendo que também pode ser usado na soldagem vertical ascendente, mas com velocidades de soldagem menores. A desvantagem do eletrodo celulósico é a relativa alta quantidade de hidrogênio difusível, formando o metal de solda susceptível a trincas. A opção de usar eletrodos básicos também é possível numa soldagem vertical ascendente, embora a velocidade de soldagem seja mais baixa (LAMOND, 2007).

Segundo Lamond (2007), três métodos principais para a realização do passe de raiz são:

- Passe de raiz externo com abertura de raiz;
- Passe de raiz externo sem abertura de raiz, com cobre-junta interna.
- Passe de raiz interno sem abertura de raiz.

Pode-se adicionar a estes métodos, que o passe de raiz externo com ou sem abertura de raiz, pode ou não ser utilizado cobre-junta. Algumas configurações das juntas usadas para estes métodos ou condições são mostradas na Fig. 2.11 (b),(c) e (d).

Entretanto, problemas ou limitações existem nestes métodos, entre eles:

- Quando se usa uma junta que use cobre-junta de cobre, há a possibilidade de inclusões do cobre na raiz do cordão.
- Com o passe de raiz interno, em soldagem circunferencial, há um mínimo diâmetro do tubo abaixo do qual o sistema não funciona além das reparações com este sistema serem muito difíceis (Lamond, 2007).
- Dificuldade e tempo gasto quando do posicionamento do tubo para manter uma abertura de raiz constante, ao longo do perímetro do tubo, antes da soldagem.

Com tudo isso, Lamond (2007) expõe que o alvo para um processo de soldagem ideal deve ser um que permita a soldagem do passe de raiz sem cobre-junta nem sistemas internos e produza ainda um cordão de raiz com um bom metal de solda com suficiente acúmulo (deposição) para assegurar uma boa espessura de cordão. Esta solda deverá também não apresentar mordeduras, falta de fusão ou porosidades e deverá apresentar propriedades mecânicas apropriadas.

A literatura recomenda que um passe de raiz deve ter entre 4 – 6 mm de altura, mas, isto depende muito da configuração da junta, chanfro estreito, abertura da raiz e/ou tamanho do nariz, condições estas que definem a altura final do passe de raiz. Na Fig. 2.14, se mostra um passe de raiz com espessura de 5,6 mm, mas sem detalhes do formato da junta.

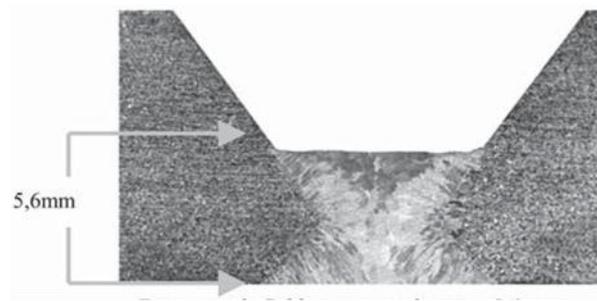


Figura 2.14 – Espessura de solda em passe de raiz – 5,6 mm; elimina o retrabalho do passe quente ER70S-6, 1,2 mm – 100% CO₂ (ABS, 2011)

Um dos defeitos que pode acontecer na realização do passe de raiz, além de defeitos internos, é a chamada concavidade interna. Segundo a norma API 1104 (2000), este defeito acontece quando se trata de soldagem de topo, como mostrado na Fig. 2.15. O cordão consegue fusão em ambas as superfícies, mas o centro do cordão está levemente abaixo da superfície interna do tubo. Segundo esta norma, a magnitude da concavidade é a distância perpendicular entre uma extensão axial da superfície da parede do tubo e o ponto mais baixo na superfície do cordão de solda, e considera que “qualquer tamanho de concavidade é aceita” desde que não seja maior que a espessura do material de base mais fino (no caso de espessuras diferentes), mas não fala da situação na qual os dois materiais de base são iguais. Este defeito também é considerado na ASME B31.1 (2005), e a restrição do comprimento desta concavidade é também considerada para não ser maior que a espessura mínima da chapa mais fina, mas não considera o caso de chapas iguais.

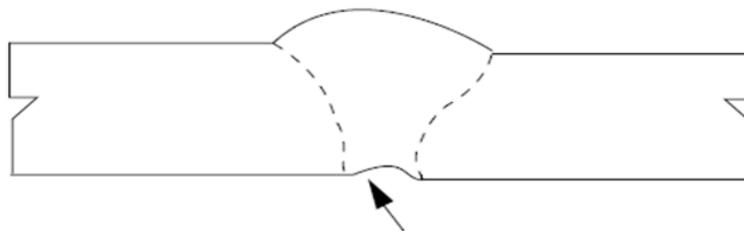


Figura 2.15 – Concavidade interna (API 1104, 2000)

Sendo que não é recomendando um tamanho máximo de concavidade a ser permitida, nem se recomenda uma forma de considerá-la, quando as chapas têm a mesma espessura, se decidiu interpretar a norma segundo as condições da junta a ser usada neste trabalho. Considerando que a norma fala que “a concavidade não deve ser maior que a espessura do material de base

mais fino”, neste trabalho se considera que a altura do tamanho de nariz é a espessura da chapa mais fina, sendo as duas alturas de nariz iguais. Com isto, e segundo a norma, se alguma concavidade aparecer no desenvolvimento deste trabalho, ela não deverá ser maior que a altura do nariz da junta. Em trabalhos onde a junta seja em “V”, sem nariz, outra forma de interpretação deverá ser adotada.

Segundo Okuruma e Taniguchi (1982), uma pequena concentração de tensões ou tensões residuais na área adjacente à junta da solda pouco afeta a resistência da junta de topo. Entretanto, a presença de trincas no metal depositado diminui consideravelmente a resistência à tração da junta soldada, o mesmo não acontecendo no caso de porosidades, que têm um efeito menor sobre a resistência da junta.

Um fator determinante para conseguir penetração total, na realização do passe de raiz, em juntas de topo é a abertura de raiz e/ou a face de raiz ou nariz. Segundo Murakawa et al. (2012), no caso da separação ou abertura da raiz, esta abertura tende a se abrir quando a velocidade de soldagem e o aporte térmico são grandes e, no caso contrário, quando o aporte térmico e a velocidade de soldagem são menores, a tendência da abertura da raiz é diminuir ou até fechar. Ainda neste caso, quando a abertura da raiz aumenta durante a soldagem, as deformações transversais se incrementam levemente quando o intervalo entre os pontos de solda, que fixam uma chapa na outra, é pequeno.

De uma forma prática, conferida em diferentes laboratórios de pesquisa, para se obter penetração total num formato de junta escolhido, são realizados testes de tentativa e erro, isto é, se consideram parâmetros de soldagem e se escolhe a configuração da junta, e quando após a soldagem a penetração total não é conseguida, se modificam ou os parâmetros de soldagem ou as medidas da junta, até a penetração total ser atingida. Estas metodologias são explicadas a seguir e representadas nas Fig. 2.16 e 2.17. Nestes exemplos é apresentada uma junta em “V” considerando um tamanho de nariz, que pode também não ser considerado:

- **Considerando uma junta de topo sem abertura de raiz:** Neste caso se escolhe um conjunto de parâmetros e se realiza o cordão de solda. Se penetração total não é conseguida, então se procede a modificar os parâmetros de soldagem mantendo-se a espessura de nariz ou, também, pode-se diminuir a espessura de nariz mantendo-se os parâmetros de soldagem (Fig. 2.16).

- **Considerando uma junta de topo com abertura de raiz:** Neste caso e com um determinado conjunto de parâmetros se realiza o cordão de solda. Se não se consegue penetração total na junta, então se aumenta a abertura de raiz mantendo-se os parâmetros de soldagem ou, também, pode-se modificar os parâmetros de soldagem mantendo-se a abertura de raiz. Tem-se a opção também de modificar a abertura de raiz e a espessura de nariz mantendo-se os parâmetros de soldagem (Fig. 2.17).

Estas técnicas ou metodologias usadas para conseguir um bom resultado, são também propostas como soluções pela AWS (1989), referido a defeitos no passe de raiz.

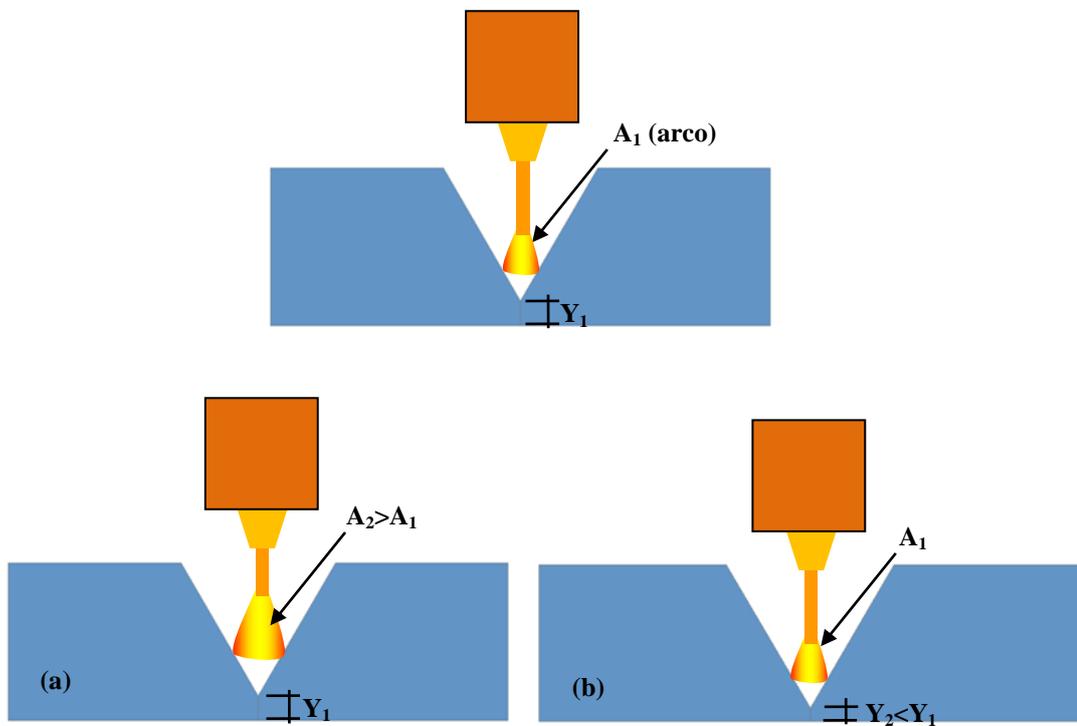


Figura 2.16 – Representação da forma prática para obter penetração em junta de topo sem abertura de raiz, modificando: (a) parâmetros de soldagem e (b) espessura do nariz

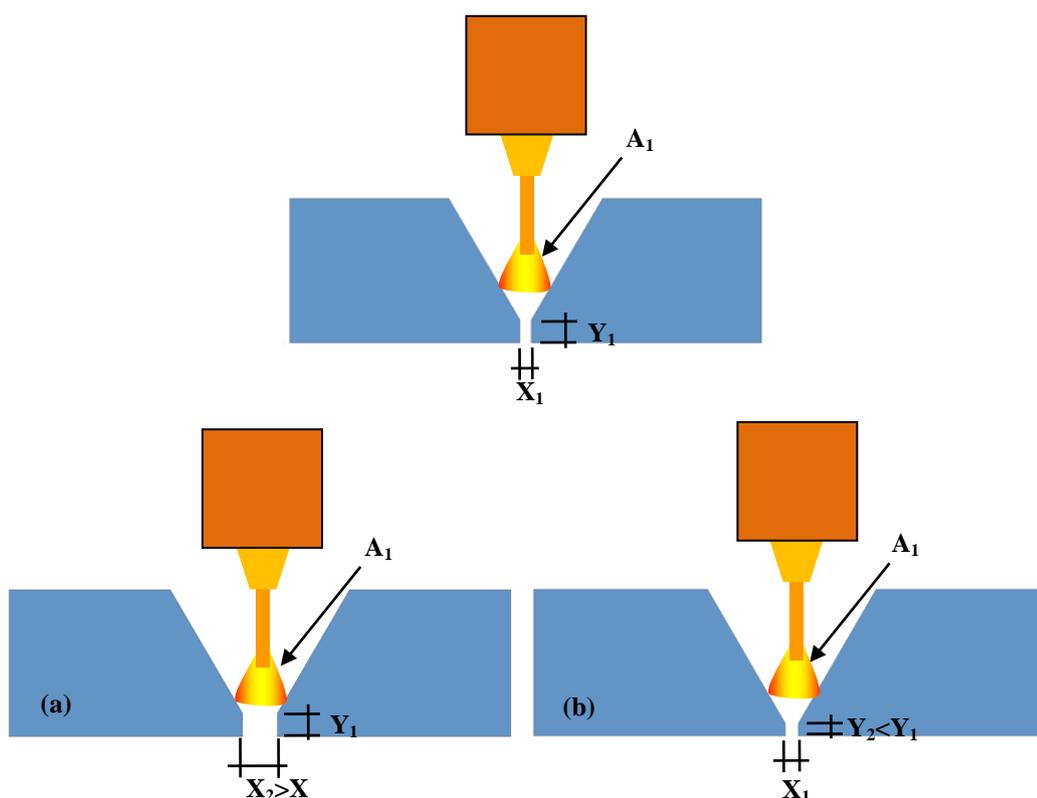


Figura 2.17 – Forma prática para obter penetração em junta de topo com abertura de raiz, modificando: (a) abertura da raiz e (b) espessura do nariz

Considerando estas duas metodologias ou técnicas, na literatura são encontrados trabalhos que utilizam, em testes preliminares, um método para determinar a abertura de raiz apropriada para um conjunto de parâmetros de soldagem escolhidos. Esta metodologia considera uma abertura de raiz variável, isto é, duas chapas planas são fixadas uma na outra, variando-se a abertura de raiz, desde um valor inicial 0 até um valor determinado diferente de 0 mm. O processo de soldagem é então realizado, desde o ponto inicial, até onde se consiga penetração total e o cordão apresente boas características visuais. Modificações do procedimento como tecimentos também são considerados e estes testes são realizados sem usar cobre-junta. A Fig. 2.18 mostra a disposição das chapas para esta metodologia.

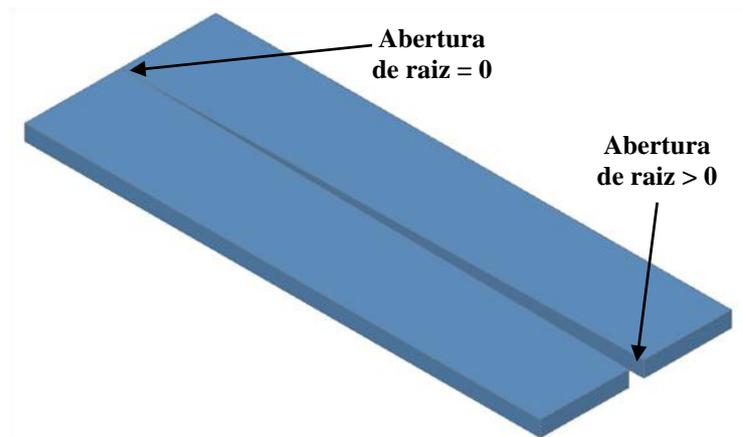


Figura 2.18 – Disposição das chapas com abertura variável utilizadas para encontrar abertura de raiz apropriada para um determinado conjunto de parâmetros de soldagem

Por outro lado, não se encontrou na literatura nenhuma metodologia que apresente alguma forma de encontrar o tamanho ou altura apropriada de nariz para um determinado conjunto de parâmetros de soldagem. Esta metodologia poderia permitir a realização do passe de raiz, em junta de topo, com um determinado tamanho de nariz, sem abertura de raiz e que não utilize cobre-junta, como a que é proposta neste trabalho.

2.5 – SOLDAGEM DE TUBOS (*Pipelines*)

O setor de “*Pipelines*”, *Onshore* e *Offshore*, têm existido por muitas décadas, no entanto é nos últimos anos com as descobertas de novas jazidas, em lugares remotos e de difíceis condições de extração, que têm aumentado grandemente os níveis de expansão. Assim, o desenvolvimento de novas tecnologias de soldagem tem feito possível incrementar a mecanização para atingir uma alta produtividade para novas instalações de tubulações.

A evolução da tecnologia MIG/MAG tem sido muito significativa para a automotização e controle da soldagem (Hudson, 2004), mas a garantia do êxito de uma tubulação, principalmente em termos de segurança, independentemente do processo de soldagem empregado, começa pelo projeto da junta, que é guiado por códigos e normas nacionais ou internacionais. Dentre as entidades normalizadoras mais atuantes no segmento de tubulações podem-se mencionar a BS (*British Standard*), ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), PETROBRAS, DNV (*Det Norske Veritas*) e API (*American Petroleum Institute*).

Destas as mais largamente empregadas são a API 5L – *Specification for Line Pipe* e API 1104 – *Welding of Pipelines and Related Facilities* (Fortes, 2004).

A linha de dutos é utilizada como um meio de transporte de fluidos, podendo ser óleo cru, produtos derivados do petróleo, gás natural, gás liquefeito de petróleo, água e outros líquidos e gases. As linhas de dutos podem ser classificadas em linhas de transmissão e sistemas de distribuição. A soldagem das linhas de dutos é uma solda circunferencial dos tubos e acessórios, sendo executadas em sua maioria, no campo. Não se inclui neste serviço a soldagem para a produção dos tubos propriamente ditos (Okumura e Taniguchi, 1982).

A soldagem circunferencial, pode ser realizada com os tubos nas posições: 1G, 2G, 5G e 6G (AWS, 2000), como representado na Fig. 2.19.

Neste trabalho, os testes de soldagem serão realizados na posição 5G, na qual pode ser bem definida a soldagem nas posições plana, vertical e sobre-cabeça. A norma AWS 3.0 (2010), determina que dependendo da modificação do eixo longitudinal do tubo, de 0° até 90°, no momento da soldagem, as posições de soldagem são modificadas, mostrando também que com o eixo do tubo na posição horizontal (5G), pode-se ter uma variação de até de $\pm 30^\circ$, sem que estas 3 posições de soldagem sejam modificadas. A Fig. 2.20, mostra o apresentado por esta norma.

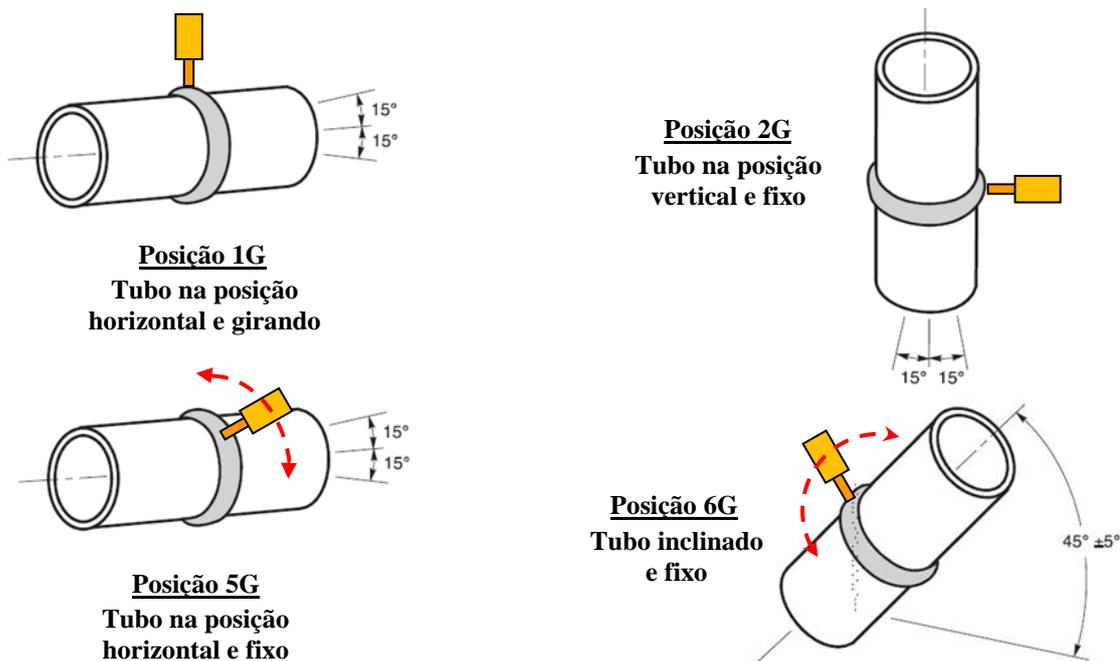


Figura 2.19 – Posicionamento dos tubos para realização da soldagem circunferencial (modificado de AWS, 2000)

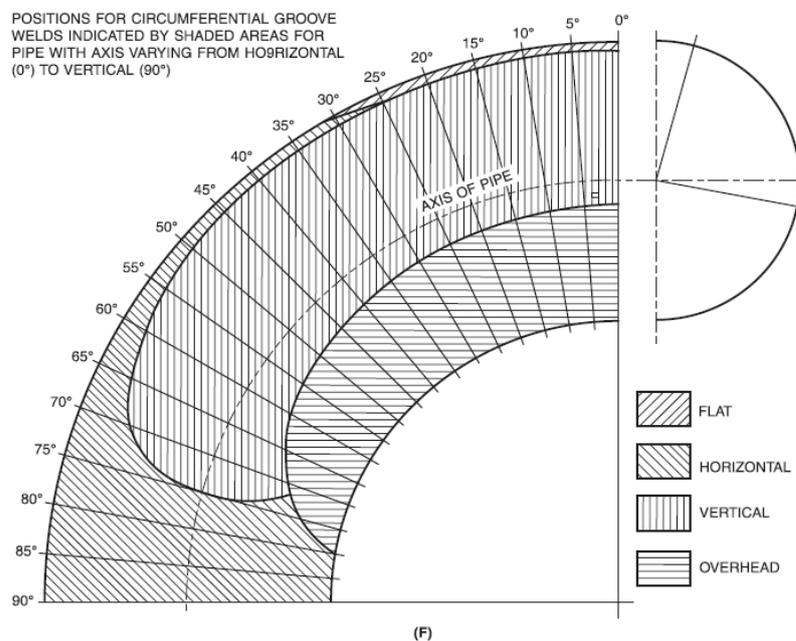


Figure B.16C—Welding Position Diagram for Groove Welds in Pipe

Figura 2.20 – Posições de soldagem com respeito ao posicionamento do eixo do tubo desde 0° até 90° segundo AWS3.0 (2010)

Quando o tubo está na posição 5G (Fig. 2.21), as posições da tocha durante a soldagem circunferencial, podem facilmente ser identificadas na seção transversal ao eixo do tubo pela semelhança com as horas na face de um relógio. Assim, o topo do tubo é a posição 12 horas no relógio e a ponto mais baixo do tubo é a posição 6 horas no relógio (Rampaul, 2003).

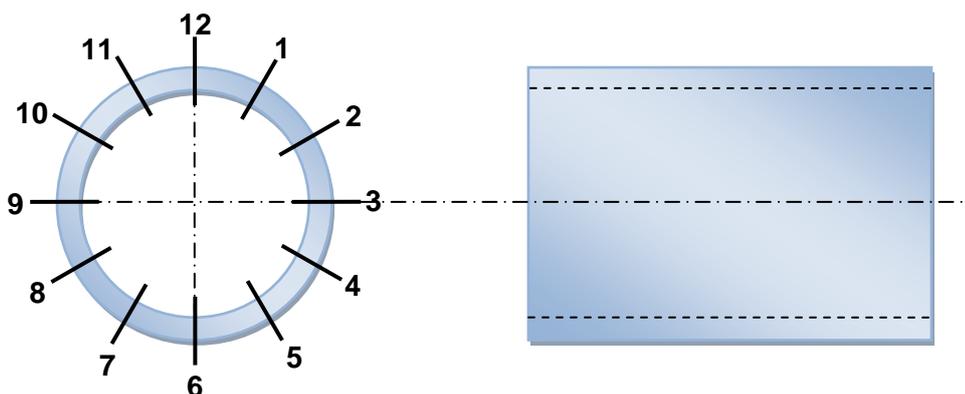


Figura 2.21- Identificação das posições de soldagem ao redor do tubo pela comparação com a face de um relógio

Os equipamentos de soldagem, para a soldagem circunferencial, foram originalmente divididos em manuais ou semiautomáticos, mecanizados e automatizados.

O principal processo de soldagem usado na soldagem de tubulações é a soldagem manual com eletrodo revestido, que graças a sua facilidade de manuseio e versatilidade é ainda o mais usado (Fortes, 2004).

A soldagem semiautomática é um processo complexo, devido ao nível de qualidade exigido. Quando a soldagem é realizada em obra, o tubo não pode ser rotacionado, com isto, a deposição do cordão deve ser realizada ao longo do perímetro do tubo originando dificuldades nas diversas posições, que o soldador deve adotar, durante o percurso da soldagem, desde a posição plana até a posição sobrecabeça. Estas posições ficam muito mais difíceis de atingir, quando a soldagem de passe de raiz é realizada pela parte interna do tubo. A Fig. 2.22 mostra o posicionamento do soldador na soldagem vertical descendente e na soldagem sobrecabeça, numa soldagem externa. Já a Fig. 2.23 mostra a soldagem semiautomática de passe de raiz pelo lado interno do tubo.



Figura 2.22 – Soldagem semiautomática (a) vertical descendente e (b) sobrecabeça



Figura 2.23 – Soldagem semiautomática de passe de raiz pela parte interna do tubo

Dependendo das mudanças de posição durante a soldagem circunferencial, refletidas no destacamento da gota, as variáveis podem ser alteradas ou modificadas para evitar o escoamento do metal líquido da poça de fusão, o que comprometeria a qualidade da solda.

Contudo, ainda nos dias atuais, quando materiais mais sofisticados, técnicas mais produtivas e mais econômicas estão à disposição dos usuários, a soldagem manual com eletrodos revestidos permanece como um processo favorável para a soldagem de tubulações. Sua facilidade de uso, capacidade de atingir posições de difícil acesso, a simplicidade dos geradores necessários (ou o fato de poderem ser aplicados com moto-geradores; redes elétricas nem sempre estão disponíveis nos locais das obras), o fato de que os gases de

proteção, necessários à soldagem com arames tubulares ou arames maciços, não são requeridos, todos esses e ainda outros são motivos para a escolha dos eletrodos revestidos.

Tendo em consideração as vantagens que a soldagem manual apresenta, as principais razões que levam à escolha de automatizar a soldagem circunferencial são a produtividade, qualidade e repetibilidade.

Soldagem mecanizada, segundo API 1104 (2000), é um processo no qual os parâmetros e orientação da tocha são controlados mecânica ou eletronicamente, mas podem ser alterados manualmente durante a soldagem para manter as condições de soldagem especificadas.

Quando a soldagem, na união de tubos, é realizada por soldagem mecânica ou automatizada, duas diferentes progressões de soldagem podem ser usadas quando o tubo está na posição horizontal: soldagem descendente e soldagem ascendente. Isto pode ser realizado tanto na soldagem de passe de raiz externa como soldagem de passe de raiz interno. A escolha destas progressões não é afetada pelo diâmetro do tubo, é dependente entre outros fatores, da espessura da parede, das ligas do tubo, do equipamento de soldagem e/ou do processo de soldagem. Independente do método a ser usado, o tubo primeiramente deve ser ponteadado para poder ser soldado junto ou para manter a distância de separação ou o encosto uniforme entre eles (Rampaul, 2003).

A união de tubos de grande diâmetro e espessura, pelo processo de soldagem, é realizada pelo passe de raiz, passe de enchimento e passe de acabamento. Considerando uma soldagem mecanizada de passe de raiz, depositado pela parte externa do tubo numa soldagem descendente, em campo, é realizado da seguinte forma (Fortes, 2004):

- O processo começa pelo biselamento dos tubos, que pode ser realizado na fabricação ou em campo, por meio de biseladoras ou chanfradeiras.
- Os tubos são acoplados ou encostados um no outro, sendo esta etapa de fundamental importância, pois definirá a junta a ser soldada, tanto quanto da abertura de raiz como do alinhamento. Para isto, um equipamento chamado de acopladeira interna é posicionado no interior dos tubos, alinhando-os, assim como também, permitindo o posicionamento de um anel de cobre-junta de cobre, ou cerâmica, na linha de encosto do diâmetro interno dos tubos, por pressão, com o intuito de evitar o vazamento do metal líquido da poça de fusão, evitar o

exagerado reforço da raiz do cordão e manter a distância da abertura de raiz constante ao redor do tubo, fazendo que a junta se mantenha homogênea. Na variação da soldagem de passe de raiz pelo lado interno do tubo, esta acopladeira tem também montado um sistema de soldagem, que dependendo do diâmetro de tubo varia em número de tochas.

- A seguir, é montado um dispositivo mecânico-eletrônico, chamado de Carrinho (*Bug*), Tartaruga ou Cabeçote, o qual se desloca sobre um trilho ou cinta rígida, fixado ao redor do diâmetro externo do tubo, levando consigo a tocha de soldagem e realizando a deposição do cordão de solda no comprimento programado.

Contudo, a realização dos passes para uma completa união dos tubos pode ser realizada por uma mistura ou combinação de processos. No passe de raiz em forma manual se utilizam os processos SMAW e o GTAW. Já numa soldagem automatizada se usa o GMAW ou o FCAW devido ao fornecimento contínuo de arame, como utilizado por Albuquerque, et al. (2012), em juntas de aço API 5L-X80 com a mistura Ar + 25%CO₂ como gás de proteção e sem a utilização de pré ou pós-aquecimento.

Considerando a progressão descendente, a união dos tubos é realizada em duas etapas, a primeira etapa começa no ponto mais alto do tubo (12 horas ou 0°), na posição plana, e termina no ponto mais baixo (6 horas ou 180°), na posição sobrecabeça, por um lado, e na segunda etapa o processo é repetido pelo lado oposto do tubo. Durante a realização da solda, a tocha se desloca ao redor dos tubos tomando diferentes posições neste percurso, sendo as posições mais críticas ou diferenciadas as posições plana (0°), vertical (90°) e sobrecabeça (180°). Neste caso, considera-se que as mesmas condições, especificamente o posicionamento ou angulação da tocha em relação ao tubo, permanece constante ao longo da soldagem. A Fig. 2.24 representa uma soldagem na progressão descendente, em 180°, com as diferentes posições da tocha durante esta soldagem, passando pelas posições: plana, vertical e sobrecabeça. Cabe ressaltar que em todo momento a tocha se desloca sobre um eixo que passa pelo seu próprio eixo longitudinal e que corta o eixo central do tubo, apresentando com isto, uma posição perpendicular á superfície do tubo em cada ponto e ao longo da soldagem.

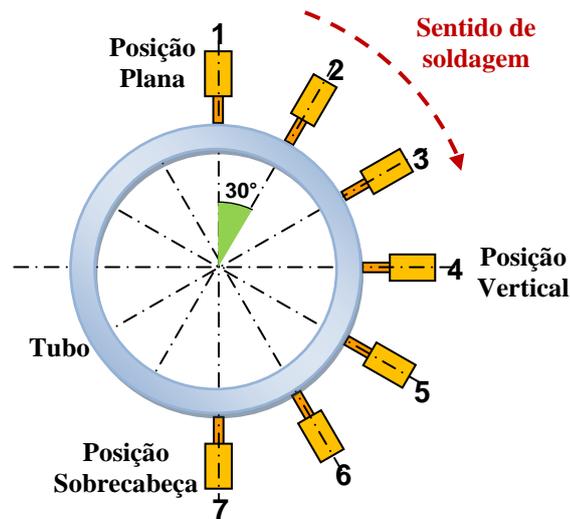


Figura 2.24 – Representação de uma soldagem na progressão descendente mostrando o posicionamento da tocha ao longo da soldagem em 180°

Segundo Denney e Blackman (2002), um completo sistema de soldagem circunferencial consiste de:

- Chanfradeira ou biseladoras ou faceadoras.
- Acopladeira interna.
- Cabeçote com cinta ou trilho no qual se possa deslocar.
- Fonte e unidade de controle.

Para a soldagem em campo, na união de tubos, é aconselhável a aplicação de manipuladores com uma concepção mecânica diferenciada. Estes tendem a suprir os requisitos de robustez, facilidade de transporte e instalação. Estes equipamentos, na sua maioria apresentam 2 ou 3 graus de liberdade o que restringe, em algumas situações, o correto posicionamento da tocha de soldagem. Existem no mercado diversos tipos e modelos de equipamentos para soldagem orbital (cabeçotes), em muitos casos desenvolvidos para trabalhos específicos e quase em sua totalidade com tecnologia estrangeira.

Para a construção de tubulações de grande diâmetro, GMAW é o processo de soldagem mais amplamente usado, assim, o original sistema mecanizado usado, com GMAW, foi uma simples tocha e alimentador de arame, posteriormente o *Serimer-Dasa* desenvolveu o primeiro equipamento mecanizado que usou duas tochas, o *Saturnex Dual Torch*. Este sistema

deposita dois passes simultaneamente, depositando o segundo cordão em 2 ou 3 segundos após o primeiro. Isto incrementa a taxa de deposição de 50% a 70% reduzindo defeitos de falta de fusão e melhorando as propriedades metalúrgicas. Em 1999, *CRC-Evans* introduz o *P500 Dual Torch Welding Head*. Este sistema apresentou um alimentador de arame remoto e um *pendant control* além de um sensor para guiar a tocha de soldagem no chanfro a ser soldado. O *Saipem* e *Vermaat* também desenvolveu posteriormente, um sistema com duas tochas (Blackman and Dorling, 2002). As Fig. 2.25 e 2.25 mostram alguns desses diferentes equipamentos.

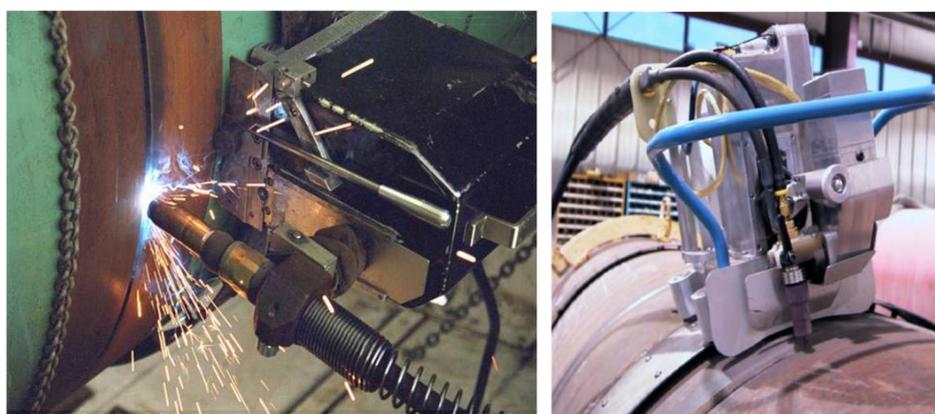


Figura 2.25 – Cabeçotes simples (a) *Vermaat Welding Bug* e (b) *RMS Welding System* (Blackman and Dorling, 2002)

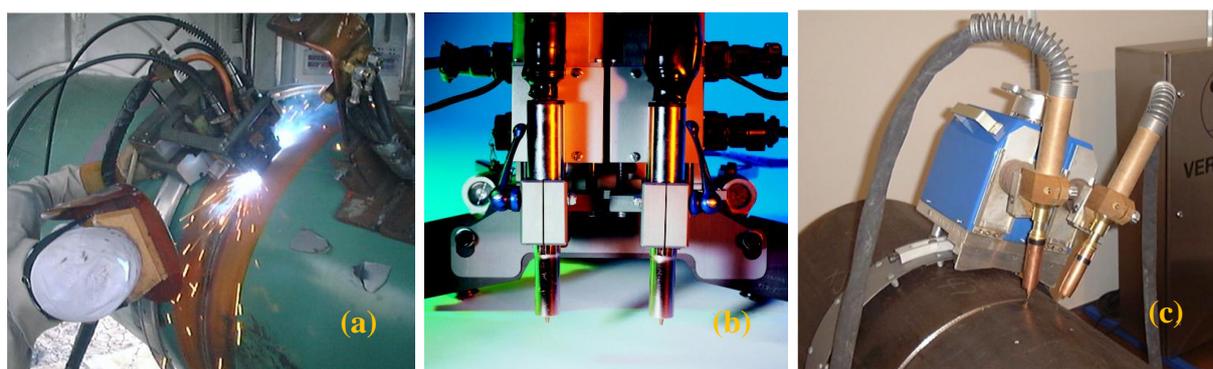


Figura 2.26 – Cabeçotes para soldagem orbital com duas tochas: (a) *Saturnax Welding System*, (b) *CRC – Evans P500* e (c) *Vermaat* (Blackman and Dorling, 2002)

Como a produtividade em soldagem de tubos é controlada pela produção do passe de raiz, o principal benefício destes sistemas é a redução de custos resultante do reduzido número estações de soldagem para o passe de enchimento e acabamento.

Assim, a WERC (*Welding Engineering Center*), da Universidade de Cranfield, desenvolveu o *Tandem Wire Welding*. Este sistema utiliza dois bicos de contato, numa mesma tocha, pelos quais alimenta dois arames direcionados para uma mesma poça de fusão. Estes arames, geralmente, são alimentados por fontes separadas, assim, interferência entre os dois arcos é minimizada pela sincronização do formato de pulso de cada fonte. Com isto, a alta corrente de um arame corresponde a uma baixa corrente no outro arame. Trabalhos em Cranfield tem mostrado que soldas de alta qualidade podem ser realizadas com duas vezes a velocidade e taxa de deposição de um dispositivo simples, ou convencional, em chanfro estreito (Blackman and Yapp, 2001).

Este dispositivo serviu para desenvolver o *Dual Tandem Welding Torch*, o qual usa duas tochas de duplo arame (*Tandem Welding*), em um mesmo cabeçote, reduzindo o tempo total de arco para soldagem de tubos para 75%. O projeto CAPS (*Cranfield Automated Pipe-welding System*), no qual foi desenvolvido este *Dual Tandem*, adicionou um sensor laser para ser usado neste dispositivo. Este sensor pode ser usado para medir o centro da linha do chanfro e medir a altura da superfície, com isto, a tocha pode ser colocada precisa e automaticamente. Variações destas distâncias são compensadas automaticamente, podendo também ajustar os parâmetros de soldagem para compensar as variações das medidas da junta. Este sensor laser foi desenvolvido e aplicado para soldagem, inicialmente originando problemas de confiabilidade e sensibilidade às condições de superfície. Atualmente estes sensores são exatos e robustos, com uma exatidão de 0,2 mm, numa faixa de 90 mm e capaz de operar em velocidades que ultrapassam 10 m/min (Blackman and Yapp, 2001). A Fig. 2.27, mostra uma tocha duplo arame e o cabeçote com duas destas tochas ou *Dual Tandem*.

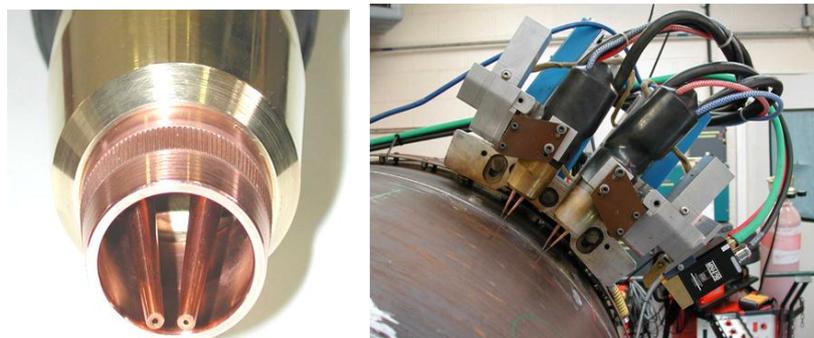


Figura 2.27 – (a) Tocha de duplo arame – *Tandem Wire Welding* (Blackman; Yapp, 2001) e (b) um cabeçote *Dual Tandem* (Lopes, 2006)

Sistemas mecanizados com mais de um cabeçote também estão disponíveis no mercado, e com controle mais avançados, como exemplo, um conjunto de uma cinta com dois cabeçotes, cada um soldando 180°, com controle independente da velocidade de arame e com fonte de soldagem que ajusta os parâmetros de soldagem de acordo com as mudanças da posição de soldagem. Isto permite, também, que uma soldagem orbital de 0° - 359°, seja realizado, em conjunto com um programa que permite programar o ponto de início e o ponto de parada do processo de soldagem, reduzindo a necessidade de assistência do operador (Pipeline & Gas Journal, 2011).

No mercado nacional, há equipamentos para soldagem circunferencial convencional, como por exemplo, o Tartilope V4, desenvolvido a partir da parceira Labsolda (UFSC) e Laprosolda (UFU), que é um manipulador com quatro graus de liberdade, constituído por três juntas prismáticas e uma rotacional. A Fig. 2.28 mostra o Tartílope e a disposição dos eixos.

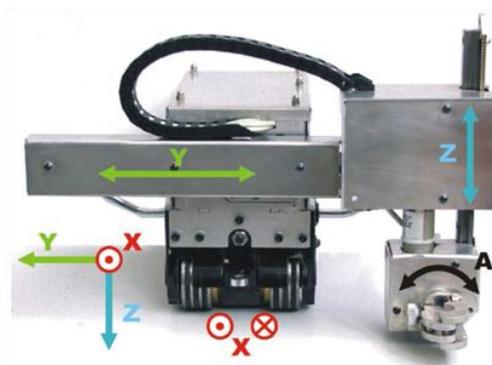


Figura 2.28 – Eixos do Tartílope V4 (Carvalho, 2009)

O V4 utilizado neste trabalho foi o primeiro protótipo desenvolvido nesta parceria, e como tal teve-se muitas dificuldade quando colocado em funcionamento. Atualizações do V4, continuaram sendo desenvolvidas até chegar no formato atual. O formato do primeiro protótipo, como recebido e em uso no Laprosolda (UFU) e o formato atual, em uso no GRACO (UnB), são apresentados na Fig. 2.29.

Uma das grandes diferenças entre as duas versões é a disposição do eixo Y, na parte frontal na primera versão e no centro na última versão, como mostrado na Fig. 2.30. Assim, o eixo Y na

parte frontal origina um desalinhamento do eixo Z em relação ao centro do tubo dificultando o posicionamento da tocha numa forma perpendicular às paredes do tubo.

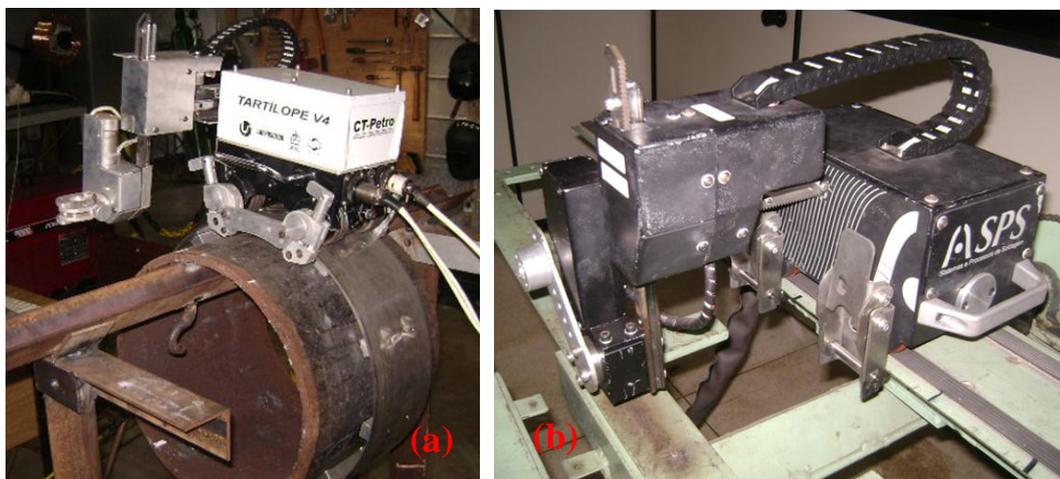


Figura 2.29 – Tartilope V4 da IMC usado no (a) Laprosolda-UFU e (b) GRACO-UnB

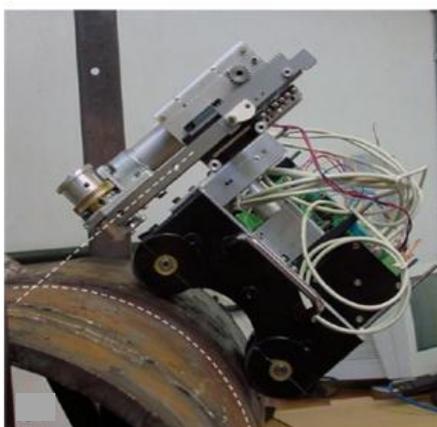


Figura 2.30 - Desalinhamento da junta Z em relação ao centro do tubo (Carvalho, 2009)

Os tubos, geralmente, são enviados para a obra com as extremidades chanfradas por meio de usinagem feita na fábrica de tubos e quando chanfrados em obra é necessário um equipamento especial chamado de chanfradeiras ou biseladoras. Antes da soldagem, é necessário inspecionar o formato e as condições da superfície da junta, remover toda a ferrugem, tinta, óleos, graxa e qualquer tipo de resíduo e, se necessário, efetuar reparos.

Modernos e rápidos equipamentos de faceamento ou chanfradeiras estão disponíveis no mercado. Fabricantes disponibilizam chanfradeiras, em campo, para diferentes diâmetros de tubos e espessuras de paredes. A série PFM 1632, da *Tri Tool INC.* (2010), por exemplo, pode chanfrar tubos na faixa de 16” a 32” de diâmetro externo, completando o chanframento em paredes de 1.5” (38,1 mm) em 2 minutos. A Fig. 2.31, mostra duas chanfradeiras em funcionamento e o chanfro terminado.



Figura 2.31 – Chanfradeiras em funcionamento em (a) campo (Fortes, 2004), (b) oficina e (c) aspecto final do chanfro no tubo (*Tri Tool INC.*, 2010)

O faceamento, realizado com equipamentos modernos, das faces a serem unidas, não garante um perfeito acoplamento entre elas. Desalinhamentos ou “Hi-Lo” (Fig. 2.32), sempre estão presentes nestas montagens. Isto devido a que os tubos nunca são perfeitamente circulares ou nem todos têm a medida exata do diâmetro interno, mesmo que as medidas dos chanfros de

cada tubo sejam iguais. Segundo OMS (2008), “um tubo perfeitamente circular e com espessura de parede constante, não existe”. Também, segundo Clarke e Gooch (2011), o Hi-Lo interno deve ser menor que 0,5 mm.

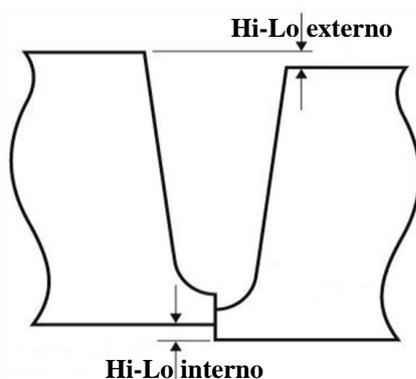


Figura 2.32 – Desalinhamento ou Hi-Lo originado pela excentricidade entre diâmetros internos dos tubos (modificado de Clarke and Gooch, 2011)

Este Hi-Lo é um forte fator de concentração de tensão, lugar onde se origina o início de trincas (Petromin Pipeliner, 2012). Nestes casos, ferramentas adicionais podem ser usadas para evitar ou corrigir estes defeitos, ou desalinhamentos, e obter um melhor acoplamento das partes a serem soldadas, evitando com isto os defeitos de solda que acarretam perda de tempo e maiores despesas nas correções, após a soldagem dos tubos.

Um das formas de corrigir o defeito dos tubos não serem perfeitamente circular, é o faceamento do diâmetro interno do tubo, tentando-se sempre que, pelo menos, as faces dos dois tubos a serem unidos tenham a medida do diâmetro interno iguais, antes que o chanframento dos tubos seja realizado. Este faceamento da parede interna do tubo é também de vital importância para um melhor contato entre o tubo e o anel de cobre-junta, evitando diversos formatos e tamanhos do reforço da raiz. Cabe mencionar que na prática, o faceamento interno do tubo pode ser realizado até um certo limite, toda vez, quanto mais material se retira para atingir um diâmetro interno homogêneo, menor é a espessura da parede do tubo, o qual pode passar a não ser mais de utilidade para as condições requeridas. A Fig. 2.33 mostra um equipamento para faceamento interno, *Counterboring Tool*, também fornecido pela Serimax (Petromin Pipeliner, 2012), e o resultado de dois faceamento do diâmetro interno do tubo. Outra ferramenta de grande utilidade, quando precisão é requerida é o *Bevel Pipe Checker*, mostrado na Fig. 2.34.



Figura 2.33 – (a) *Counterboring Tool*, diâmetro interno do tubo: (b) homogêneo e (c) não homogêneo, após processo de usinagem (Clarke and Gooch, 2011)

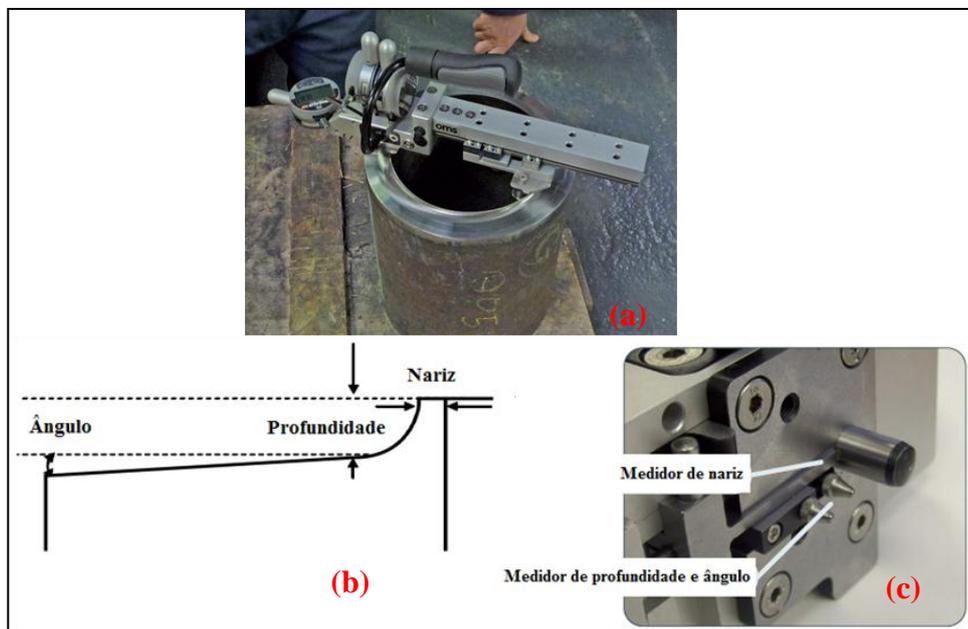


Figura 2.34 – Ferramenta para medição da configuração da junta - *Bevel Pipe Checker* (OMS, 2011)

Na soldagem circunferencial, é muito importante o perfeito alinhamento, para se conseguir uma soldagem satisfatória do passe de raiz, e uma boa fixação. Para este propósito, são

utilizados dispositivos internos ou externos. Do ponto de vista da eficiência da fixação, a fixação interna é superior, permitindo adicionalmente, a omissão de ponteamento. A abertura da raiz é mantida com o auxílio de espaçadores. No caso de se usarem pontos de solda, estes se tornam parte da raiz da solda, por esta razão, a qualidade do ponteamento deve ser equivalente ou superior à da solda principal (Okumura and Taniguchi, 1982).

Quanto à linha das acopladeiras, existem no mercado as que somente ajustam uma cobre-junta ao diâmetro interno do tubo, as que conformam uma câmara de purga ou de proteção da raiz do passe de raiz, por meio de gases, e as que além de alinhar e ajustar a cobre-junta, fornecem uma pressão alta que permite arredondar o formato oval do tubo (Tri Tool INC., 2010). A Fig. 2.35 e a Fig. 2.36 mostram estas acopladeiras.

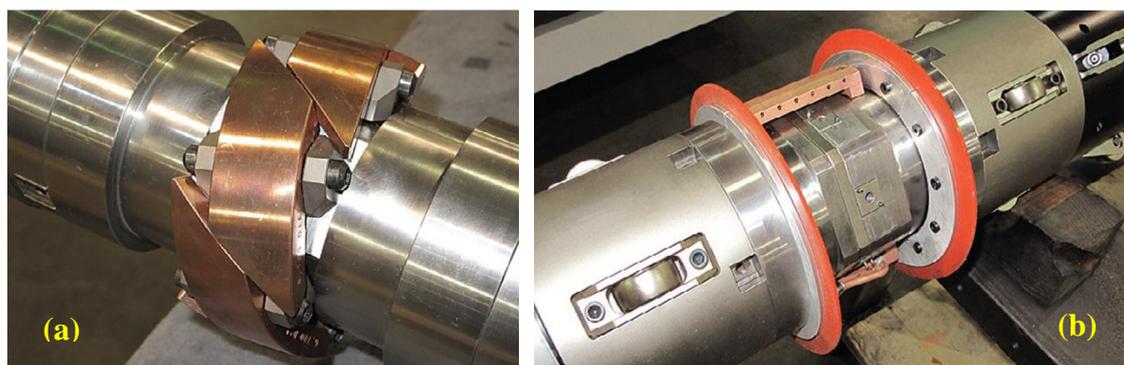


Figura 2.35 – (a) Acopladeiras: para posicionar cobre-junta de cobre e (b) formando uma câmara de purga de gases para proteção da raiz no passe de raiz (b) (Tri Tool INC., 2010)



Figura 2.36 – Equipamento que providencia alinhamento do tubo, cobre-junta e arredondamento do tubo simultaneamente (Tri Tools INC, 2010)

Alguns autores referem o uso das acopladeiras como apresentado a seguir:

- Segundo Stava (2009), o passe de raiz, com abertura de raiz, pode ser realizado três ou quatro vezes mais rápido que GTAW usando o processo STT, quando integrado com uma “acopladeira” em um sistema automatizado de soldagem circunferencial, assim cordões sem falta de fusão são conseguidos.
- A ABS (2006) afirma que as acopladeiras internas permitem tracionar a junta circunferencialmente quando do acoplamento, reduzindo a tensão residual de soldagem. Já a acopladeira externa não reduz as tensões.
- A TUBENET (2009) relata que o uso de acopladeira é de custo alto e a tira de cobre desgasta e requer reposição freqüente.

A Fig. 2.37, mostra a montagem de uma acopladeira e/ou equipamento de soldagem interno, dentro do tubo.



Figura 2.37 – Posicionamento do dispositivo para soldagem orbital interna (Fortes, 2004)

Na soldagem interna a principal desvantagem é a impossibilidade de se ver a deposição do cordão o que faz impossível qualquer correção do operador do equipamento. Isto faz esta técnica de maior risco, o que poderia resultar em maior tempo e custos de reparo. A isto pode ser adicionado o alto custo do equipamento e a limitação do tamanho mínimo para poder usar este equipamento (TUBENET, 2009). Detalhes da posição da tocha e do momento de funcionamento de um equipamento de soldagem interna é mostrado na Fig. 2.38.

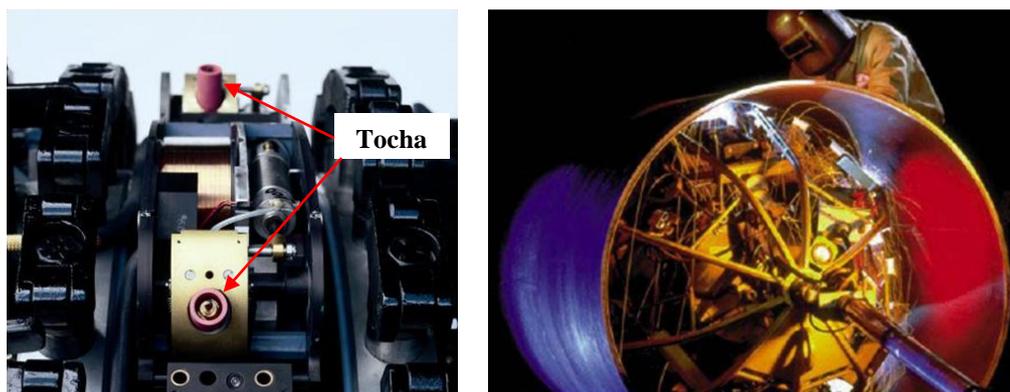


Figura 2.38 – Detalhe das tochas na máquina de soldagem interna (a) e Máquina de soldagem interna em operação (b) (Fortes, 2004)

Os equipamentos aqui apresentados são alguns dos diferentes modelos que existem no mercado para a realização da soldagem circunferencial e para o controle de medidas requeridas nesta soldagem.

É evidente que processos de soldagem de alta produção têm inerente tendência a produzir falta de fusão. Incrementando a espessura da parede resulta em maior dureza na área soldada e incrementa a tendência de trincas. Isto é primeiramente devido aos seguintes fatores:

- Para obter a mesma resistência, tubos de parede mais grossa tendem a ter maiores teores de elementos de liga e maior carbono equivalente que em tubos de paredes mais finas. Isso resulta em maior dureza na solda e na ZAC. Aços de maior espessura esfriam mais rápido o que incrementa a dureza na área de solda. Tubo mais grosso é mais rígido, resultando em maior tensão residual. É mais difícil para o hidrogênio escapar da área de solda (poça de fusão) devido à maior taxa de resfriamento e à incrementada distância necessária para viajar até a superfície. Então não pode ser assumido que um método do passe de raiz, que foi bem realizado em tubo com espessura de parede fina pode ser realizada exatamente como com o da parede grossa. Altas temperaturas de pré-aquecimento, consumível de baixo hidrogênio ou diferentes procedimentos de soldagem podem ser necessários (Lamond, 2007).

Entretanto, mesmo considerando toda a experiência já adquirida, a tecnologia de soldagem de tubulações encontra-se em constante desenvolvimento, atualizando-se para atender os requisitos de soldabilidade de novos materiais e as crescentes necessidades de aumento da

produtividade (Fedele, 2002). Os metais de adição empregados são geralmente arames sólidos ou tubulares, com diâmetros variando em torno de 0,9 a 1,2 mm. Nestes casos, prefere-se adotar um arame de menor resistência mecânica e maior tenacidade para a deposição do passe de raiz. Em seguida, seleciona-se outro arame para o enchimento e acabamento de acordo com os valores mecânicos do tubo que está sendo soldado. O gás de proteção normalmente utilizado é o gás carbônico puro (CO₂). No entanto, combinações Argônio/CO₂ (75%/25%) podem ser utilizadas para a deposição do passe de raiz e do passe de cobertura, nos quais existe uma maior preocupação com a configuração geométrica do cordão de solda (Fedele, 2002).

2.6 – PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Geralmente, a qualidade de uma junta soldada é diretamente influenciada pelos parâmetros de entrada do processo de solda, então, soldagem pode ser considerada como um processo multi-entrada e multi-saída. Infelizmente, um problema comum que enfrenta o soldador é o controle dos parâmetros de entrada para obter uma junta soldada com a geometria do cordão requerida e qualidade da solda com mínima tensão residual e distorção. Tradicionalmente é necessário determinar parâmetros de soldagem para cada novo produto soldado e poder obter uma junta soldada com as especificações requeridas. Para fazer isto, se requer gastar um tempo em tentativa e erro, com os parâmetros de entrada escolhidos pela experiência do Engenheiro ou operador da máquina. Então, as soldas são examinadas para determinar se atingem as especificações ou não, o que determinará a escolha ou não dos parâmetros de solda que produzam uma junta soldada que melhor atenda os requerimentos necessários. Além disso, o que não é atingido ou algumas vezes não considerado, pode ser uma combinação de parâmetros de soldagem otimizados, toda vez que soldas podem ser produzidas com muitos diferentes parâmetros de soldagem. Em outras palavras, há algumas vezes mais do que uma combinação de parâmetros ideais de soldagem, os quais podem ser usados somente se forem determinados.

Assim, para resolver esse problema vários métodos de otimização podem ser aplicados para relacionar as variáveis de saída definidas através de modelos matemáticos para definir a relação entre os parâmetros de entrada com as variáveis de saída. Nos últimos tempos,

técnicas de Planejamento Experimental estão sendo usadas para executar tais otimizações (Benyounis and Olabi, 2008).

Trabalhos como Murugan and Parmar (1994), que utilizou um planejamento fatorial de 4 fatores em 5 níveis para prever a geometria do cordão de solda em aço 316L. Também Kim et al. (2003) utilizou o planejamento fatorial para relacionar a corrente, tensão e velocidade de soldagem com a largura e altura do cordão assim como também a penetração em chapa AS 1204 com a técnica de deposição sobre chapa.

Contudo, o uso do planejamento experimental neste trabalho não foi com o intuito de otimização de parâmetros e sim de ter uma ferramenta que permita a realização dos testes de uma forma ordenada e mais rápida.

3 - DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTOS E PROPOSTA DE METOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas a concepção e a construção de equipamentos que serão utilizados para o desenvolvimento deste trabalho: Suporte para soldagem utomatizada em diferentes posições e o Simulador de Soldagem de Dutos por Retificação (SSDR)

3.1 – SUPORTE PARA SOLDAGEM AUTOMATIZADA EM DIFERENTES POSIÇÕES

3.1.1 – Justificativa

O processo de soldagem é o processo mais utilizado na união de metais no mundo inteiro. Este processo pode ser usado, entre outras coisas, para fabricar e montar diferentes configurações de estruturas, onde as partes a serem soldadas, que conformam a estrutura, podem-se encontrar em diferentes posições. Uma dessas estruturas são as tubulações, nas quais durante a realização da soldagem o cordão de solda é depositado em diferentes posições ao longo do perímetro do tubo. Pode-se considerar, nesta soldagem circunferencial, que as posições críticas ou diferenciadas são as posições de soldagem plana, vertical e sobre-cabeça.

Com isto, para realizar testes de soldagem nas três posições já mencionadas, motivo de estudo deste trabalho, foi necessário desenvolver um dispositivo, ou suporte, que facilitasse a fixação e o posicionamento das placas de teste, como alvo principal, assim como também adicionar algumas outras funções para fazé-lo mais versátil.

3.1.2 – Introdução

Durante a realização da soldagem circunferencial, a tocha se desloca ao redor do perímetro do tubo, mudando a cada instante de posição desde o ponto mais alto do tubo, posição plana, até o ponto mais baixo, posição sobre-cabeça, numa soldagem descendente de 180°, ou desde a posição sobre-cabeça até a posição plana, se a soldagem for ascendente. Assim, pode-se

considerar que as posições mais críticas ou diferenciadas desta soldagem são as posições, plana, vertical e sobre-cabeça.

Nos laboratórios de pesquisa, quando se trabalha com soldagem de tubulação, testes preliminares são realizados em chapa plana, nas 3 posições de soldagem, com o intuito de encontrar um conjunto de parâmetros apropriados (parametrização), os quais serviram para realizar uma soldagem com boas características visuais e mecânicas nestas 3 posições, isto é, os parâmetros de soldagem devem ser os mesmos. Posteriormente, estes parâmetros serão utilizados na realização de soldagem circunferencial. A Fig. 3.1, representa uma soldagem circunferencial, em 180° mostrando ainda o posicionamento da tocha nas posições críticas da soldagem circunferencial e o seu equivalente na soldagem em chapas planas.

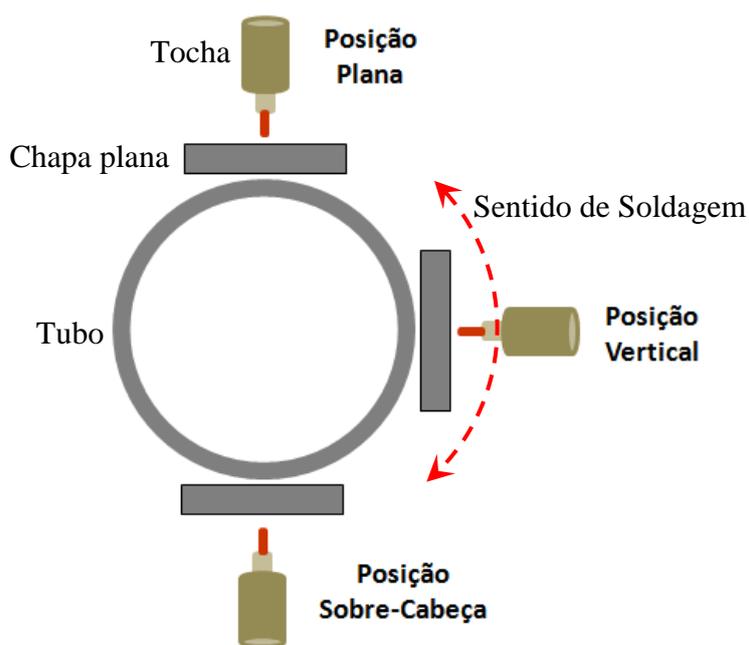


Figura 3.1 – Posicionamento da tocha nas posições críticas da soldagem circunferencial e o seu equivalente de soldagem em chapa plana

Uma grande dificuldade encontrada para a realização destes testes preliminares é a fixação e posicionamento das chapas, Em geral, são utilizados artifícios para fixação destas chapas nas bancadas de soldagem, através de parafusos, grampos, sargentos ou até mesmo são soldadas em outra estrutura. Do ponto de vista acadêmico, essas fixações provocam variações

indesejadas nos experimentos como distorções, falta de repetibilidade, perda de tempo tanto na fixação como na retirada das placas de teste, entre outros.

Ante isto, foi necessário construir um dispositivo que permita fixar e posicionar as chapas para a realização dos testes, de uma forma mais rápida e repetitiva.

3.1.3 – Construção

O suporte é uma estrutura construída de aço e dividida em duas partes, a primeira parte é denominada de “mesa” onde as chapas de teste são fixadas e a segunda parte é uma estrutura “base” que consta principalmente de duas hastas cilíndricas paralelas, onde a mesa desliza, e de uma cantoneira central a qual ajuda na fixação e na mudança de posição da mesa. Estes detalhes são mostrados na Fig. 3.2.

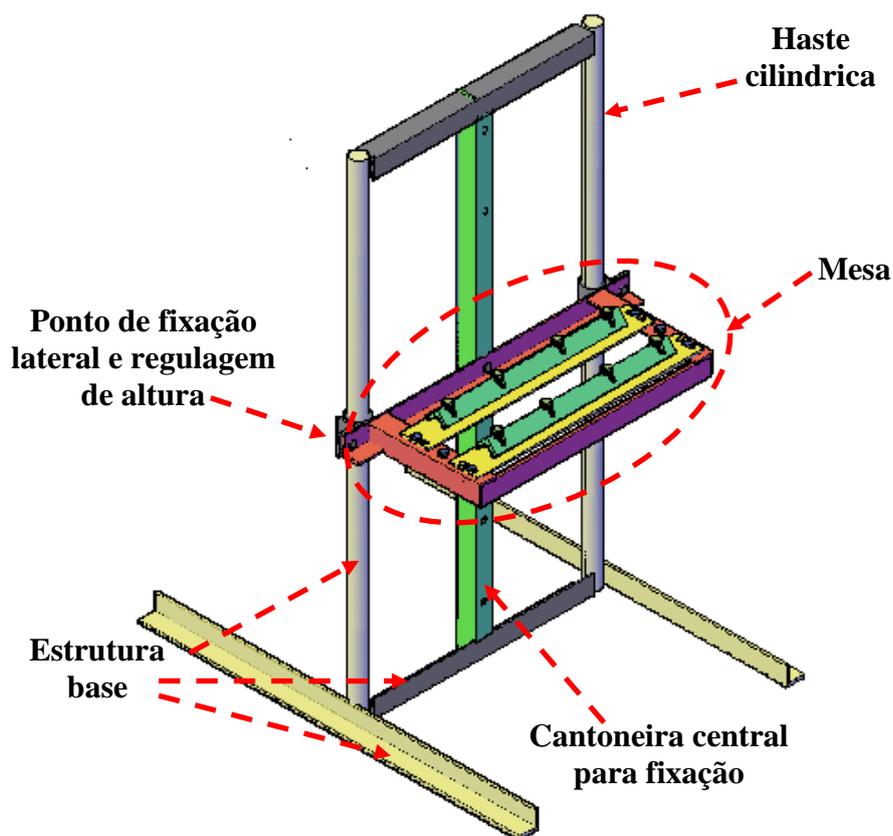


Figura 3.2 – Suporte para fixação e posicionamento de placas de teste

Com intenção de fazer um suporte de maior versatilidade, além da tradicional fixação das placas de teste, foram projetadas algumas funções, apresentadas a seguir.

A mesa têm duas chapas base com 4 parafusos de aço dispostos ao longo de cada uma delas, e duas cantoneiras as quais pressionam as placas de teste sobre as chapas base, fixando-as. A pressão das cantoneiras sobre as chapas é resultado do aperto dos parafusos posicionados nas chapas base (Fig. 3.3).

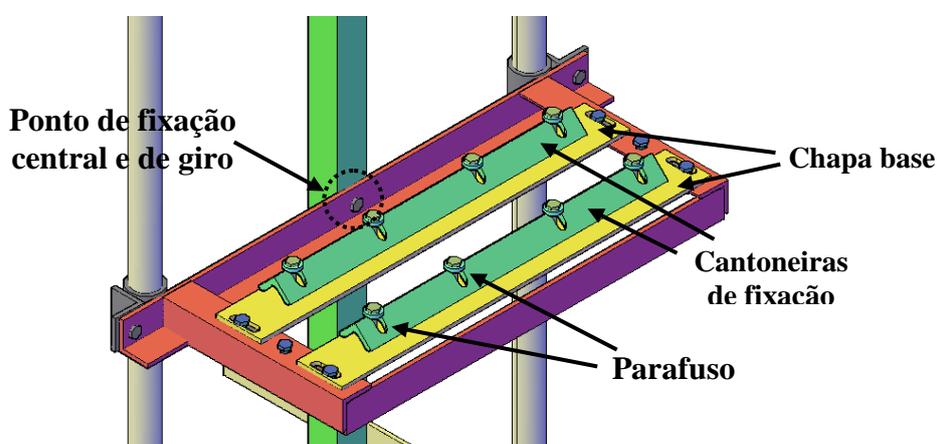


Figura 3.3 – Detalhe da mesa e componentes do suporte

Foram feitas ranhuras transversais nas cantoneiras, onde os parafusos são posicionados, permitindo que estas cantoneiras possam girar sobre o seu eixo longitudinal e possam fixar placas de teste de maior espessura.

Foram realizadas, também, duas ranhuras transversais nos extremos das duas chapas base com o intuito que elas possam-se juntar ou afastar, permitindo com isso a fixação de chapas de diferentes larguras (Fig. 3.4)

A mesa também permite a fixação de outra chapa, no meio e encima das duas chapas base, que poderá ser uma chapa de cobre a ser usada como cobre-junta quando o processo de soldagem o requeira, com isto, testes de soldagem com e sem cobre-junta podem ser realizados.

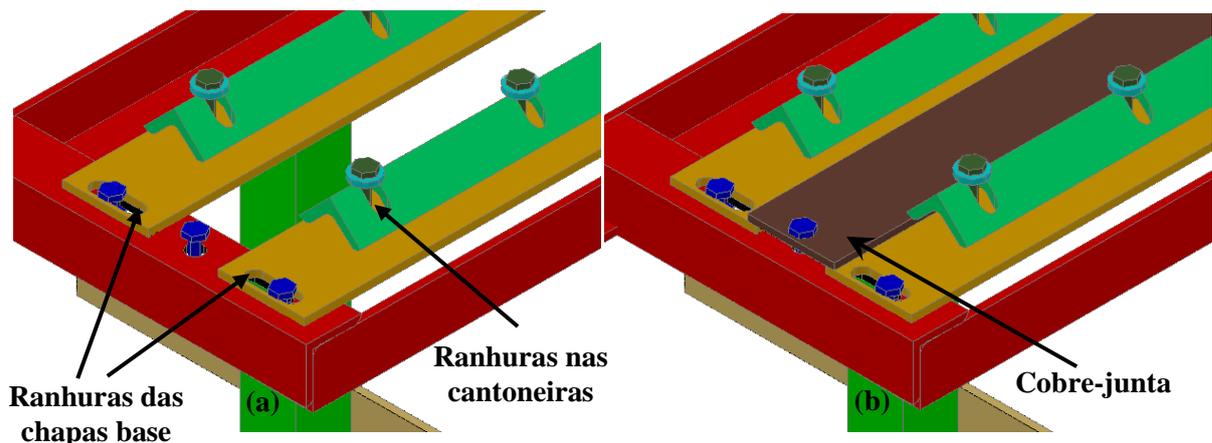


Figura 3.4 – Detalhe da mesa para soldagem (a) sem cobre-junta e (b) com cobre-junta

A Fig. 3.5 mostra a mesa com a fixação das placas de teste com e sem cobre-junta, como usado neste trabalho.

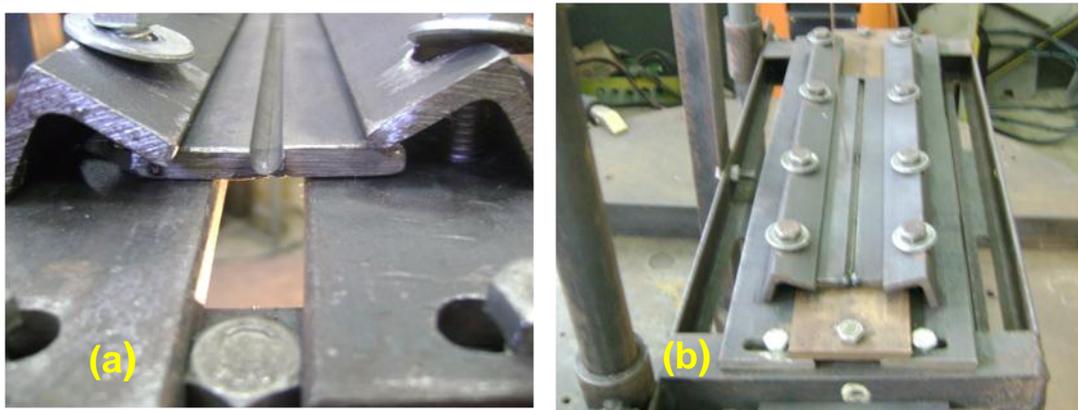


Figura 3.5 – Chapas de testes usadas neste trabalho, fixadas para soldagem (a) sem cobre-junta e (b) com cobre-junta

3.1.4 – Versatilidade na mudança de posição de soldagem

A mesa é fixada na base através de três parafusos, um em cada extremidade e um no ponto central, fazendo com isto que a mesa e as placas de teste possam ser modificadas de posicionamento para realizar a soldagem plana, vertical e sobrecabeça, como explicado a seguir:

- Para a posição plana: a mesa é parafusada, pelos extremos, em duas pequenas seções de tubos e no ponto central, numa cantoneira parte da estrutura base. Desparafusando o ponto central e diminuindo a pressão dos anéis de tubos se permitirá o deslizamento, destes

anéis, sobre as hastes cilíndricas modificando com isto, a altura de fixação da mesa e das placas de teste.

- Para a posição vertical: foram realizados três furos igualmente espaçados na cantoneira da estrutura base e na mesa, assim, para se efetuar a mudança para a posição vertical é necessário apenas a retirada dos parafusos das extremidades, diminuir o aperto do parafuso central na cantoneira e girar a mesa, de 90°, sobre o eixo do parafuso neste ponto central, parafusando novamente a mesa desta vez na cantoneira central da estrutura base.
- Para a posição sobrecabeça: a fixação é similar à fixação da posição plana, mas deve-se girar a mesa em 180°, na posição mais alta permitida.

A Fig. 3.6 mostra o suporte com a mesa e as placas de testes finalmente posicionadas nas três posições, para a qual foi projetada: plana, vertical e sobrecabeça.

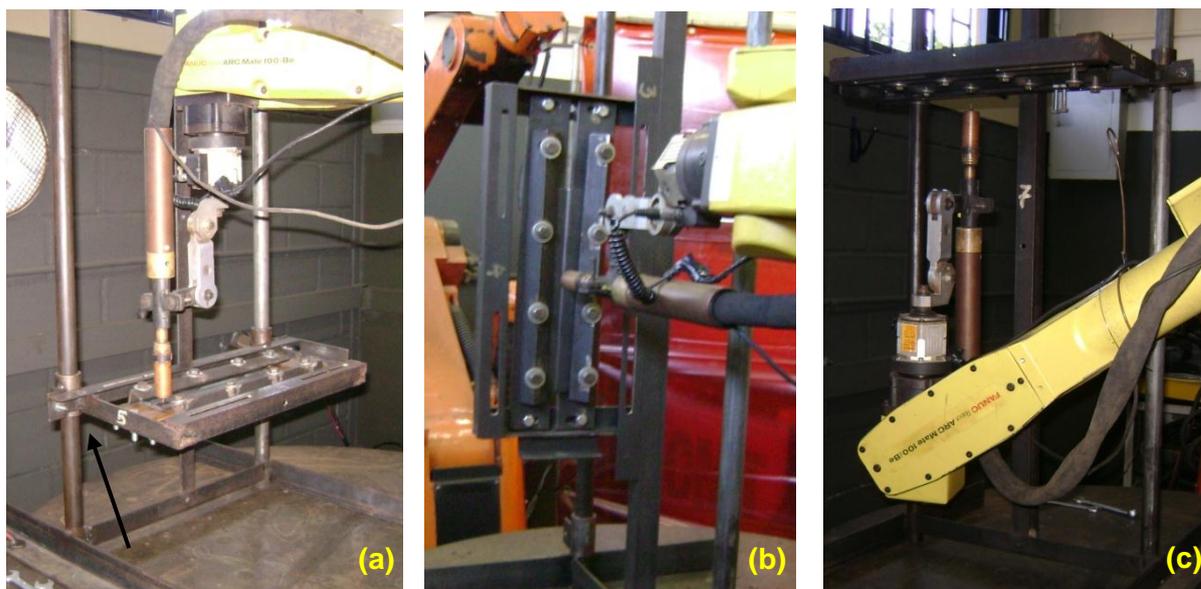


Figura 3.6 – Suporte com a mesa e chapas de teste posicionadas para a soldagem (a) plana, (b) vertical e (c) sobrecabeça

Cabe ressaltar que o suporte foi projetado para ser usado sobre uma bancada, então a altura máxima de posicionamento da mesa, para a posição sobrecabeça, foi projetada de tal forma que o robô *Arcmate* 100 iB, no bloco 5H no Laprosolda, possa-se posicionar embaixo da mesa permitindo a soldagem nesta posição, como mostrado na Fig. 3.6c.

Outra particularidade do suporte é que permite a visualização da formação da raiz do cordão durante a soldagem. Isto é possível devido aos rasgos das chapas base da mesa, que permitem a regulagem lateral, conseguindo-se assim um espaço livre apropriado que permite, além da união de chapas por soldagem sem cobre-junta, visualizar a formação da raiz do cordão durante a soldagem o que poderá servir para pesquisas tanto para análise, deste efeito, por filmagem ou por câmera termográfica, entre outros. A Fig. 3.7, mostra o momento de realização de uma soldagem vertical descendente, podendo-se ver o avanço da fusão ou penetração, na placa, segundo o avanço do processo de soldagem.

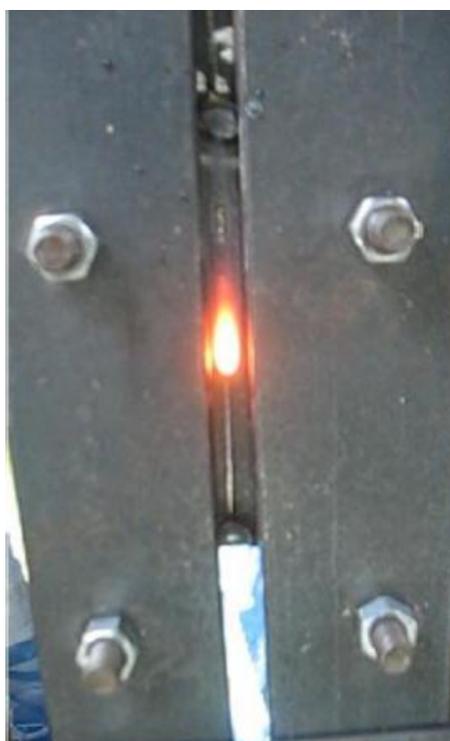


Figura 3.7 – Vista inferior da mesa posicionada para uma soldagem vertical descendente e sem cobre-junta, podendo-se ver o avanço da parte aquecida, pelo arco ao longo da soldagem

3.2 – CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO DO SIMULADOR DE SOLDAGEM DE DUTOS POR RETIFICAÇÃO - SDR

Como já explicado anteriormente, a união de tubos pelo processo de soldagem é realizada em duas etapas. Na primeira etapa a soldagem começa no ponto mais alto do tubo (12 horas ou

0°) na posição plana e termina no ponto mais baixo do tubo (6 horas ou 180°) na posição sobrecabeça, numa soldagem descendente, completando-se a união de uma forma similar pelo lado oposto do tubo. Pode-se realizar também uma soldagem no sentido ascendente.

O desenvolvimento de pesquisas em soldagem circunferencial, em laboratórios de pesquisa, pode ser realizado usando-se robôs antropomórficos, braços robóticos, ou usando-se os equipamentos de soldagem circunferencial convencional, que consistem de um cabeçote (carro ou tartaruga) que se desloca sobre uma cinta ou correntes fixadas exteriormente ao tubo. A soldagem semiautomática (usando-se um soldador) é alternativa para aqueles que não têm equipamentos apropriados.

Nos centros de pesquisas, a soldagem de tubos ou soldagem circunferencial, é realizada em seções de tubos que dependendo do diâmetro, da espessura da parede e o grau (regulamentado pela norma API), fazem estas pesquisas um tanto onerosas. A isto, podem-se adicionar os problemas encontrados na parte logística, problemas de tempo originados pelos poucos fornecedores, longos prazos de entrega e difícil manipulação (problemas que se agravam para maiores dimensões). Estes fatos, de alguma forma, desincentivam os laboratórios de pesquisas e usuários aumentar as pesquisas nesta área.

Nasce assim, de um conjunto de inquietudes, a idéia do desenvolvimento de um equipamento que simule uma soldagem orbital por meio da soldagem em chapas planas. Este dispositivo será denominado SDDR, acrônimo de Simulador de Soldagem de Dutos por Retificação, e que será chamado neste trabalho como “simulador”.

Este equipamento deve realizar uma soldagem em chapa plana, mas com as características de uma soldagem circunferencial, isto é, enquanto se realiza uma soldagem em chapa plana, o dispositivo fornecerá um movimento de rotação ou giro ao conjunto de soldagem (chapas de teste + cabeçote de soldagem + tocha) fazendo com isto que a tocha tome diferentes posições a cada instante e que serão as mesmas posições que a tocha tomaria se estivesse sendo realizada soldagem circunferencial convencional, considerando alguns parâmetros similares. Assim, o metal de base a ser utilizado será chapas planas ao invés de tubos, como utilizados na soldagem circunferencial convencional. Cabe mencionar, que não se encontrou na

literatura, nenhuma informação ao respeito deste equipamento, nem similares, por isso é apresentado com mais detalhe a continuação.

Tenta-se com o desenvolvimento desta máquina diminuir as despesas em quanto à compra de materiais de testes, que serão chapas planas ao invés de tubos, e com isto também diminuirá o tempo gasto na parte logística, devido aos poucos fabricantes ou fornecedores de tubos assim como ao tempo e dinheiro gasto no transporte destes tubos até o centro de pesquisa.

3.2.1 – Idealização e concepção do SDR

Foi pensado durante a concepção do simulador que, para simular uma soldagem circunferencial enquanto se realiza a soldagem em chapas planas, este dispositivo deverá posicionar a tocha nas mesmas diferentes posições em que esta tocha ficaria durante a soldagem circunferencial convencional, mas desta vez, ao longo do comprimento das chapas planas sendo soldadas. O posicionamento da tocha, nestas diferentes posições pensadas, deverá ser realizado pelo giro fornecido por um motor de corrente contínua com uma velocidade angular constante calculada.

Uma esquematização desta idéia é apresentada na Fig. 3.8a, que mostra uma soldagem circunferencial convencional, deslocando-se a tocha, no sentido descendente, desde o ponto mais alto, ponto 1 (0°), na posição plana, até o ponto mais baixo, ponto 7 (180°), na posição sobrecabeça, mostrando ainda o posicionamento progressivo da tocha em um intervalo de 30° . A Fig. 3.8b representa esquematicamente o funcionamento do simulador, sendo o ponto inicial de soldagem o ponto 1, na posição plana (0°), finalizando no ponto 7, posição sobrecabeça (180°), mostrando também o posicionamento progressivo da tocha no mesmo intervalo de 30° . Com isto, pode-se ver nestas figuras, que o posicionamento da tocha é a mesma para os dois procedimentos de soldagem.

A validação do simulador será realizada perante a comparação entre os cordões de solda realizados nos dois procedimentos, (a) e (b) da Fig. 3.8.

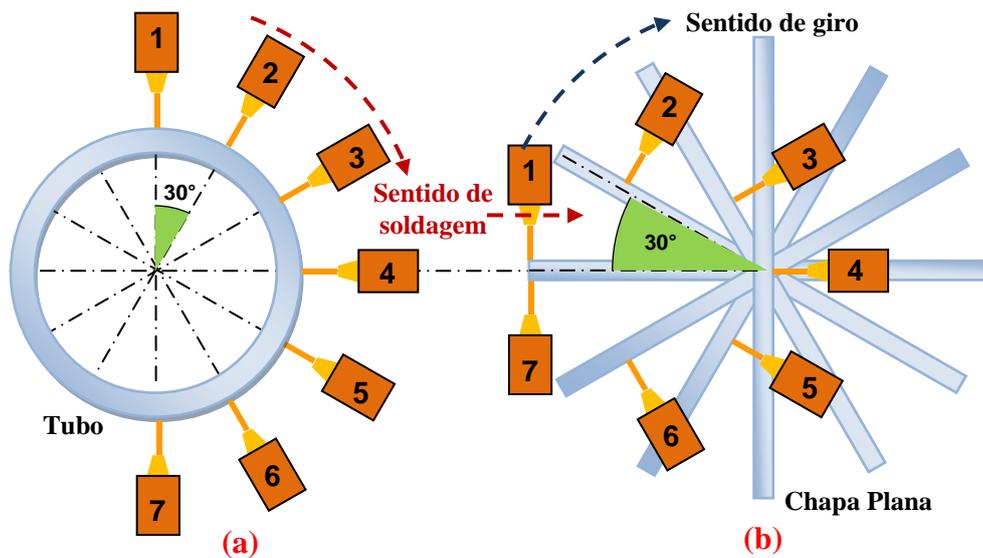


Figura 3.8 - Representação esquemática dos procedimentos de: (a) soldagem circunferencial convencional e (b) do simulador

3.2.2 – Construção do SSTR

A Fig. 3.9. mostra um desenho CAD, em perspectiva, do SSTR montado e suas partes ou componentes, onde:

- P1 – Uma base para apoiar e fixar as chapas planas;
- P2 – Uma base para apoiar e fixar o trilho, onde o cabeçote se deslocará para realizar uma soldagem plana;
- P3 – Um eixo excêntrico, onde estarão apoiadas as bases P1 e P2;
- P4 – Uma estrutura principal para suporte do conjunto e os acessórios do simulador;
- P5 – Um motor de corrente contínua (CC) com um duplo redutor mecânico acoplado na sua saída.

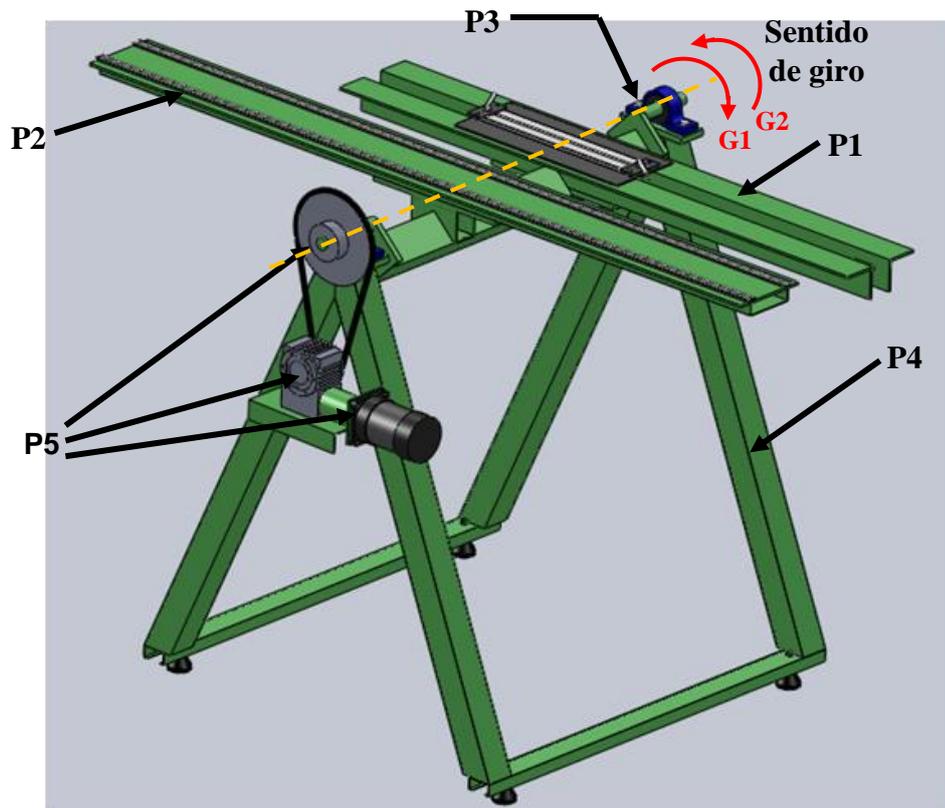


Figura 3.9 – Vista em perspectiva do simulador e seus componentes

Baseado nas medidas do trilho flexível 1500x15,6x1,5 mm, fornecido pelo fabricante (IMC), foi usada uma chapa com a espessura de 3 mm, para apoio e deslocamento do Tartílope dando maior rigidez ao simulador. Considerando que o Tartílope tem 300 mm de comprimento, a distância livre de deslocamento sobre o trilho ficou de 1200 mm, comprimento máximo para as chapas de teste que simularão de forma retificada o semiperímetro do tubo. Um esquema da disposição do trilho, do Tartílope e das placas de teste é apresentado com mais detalhe na Fig. 3.10.

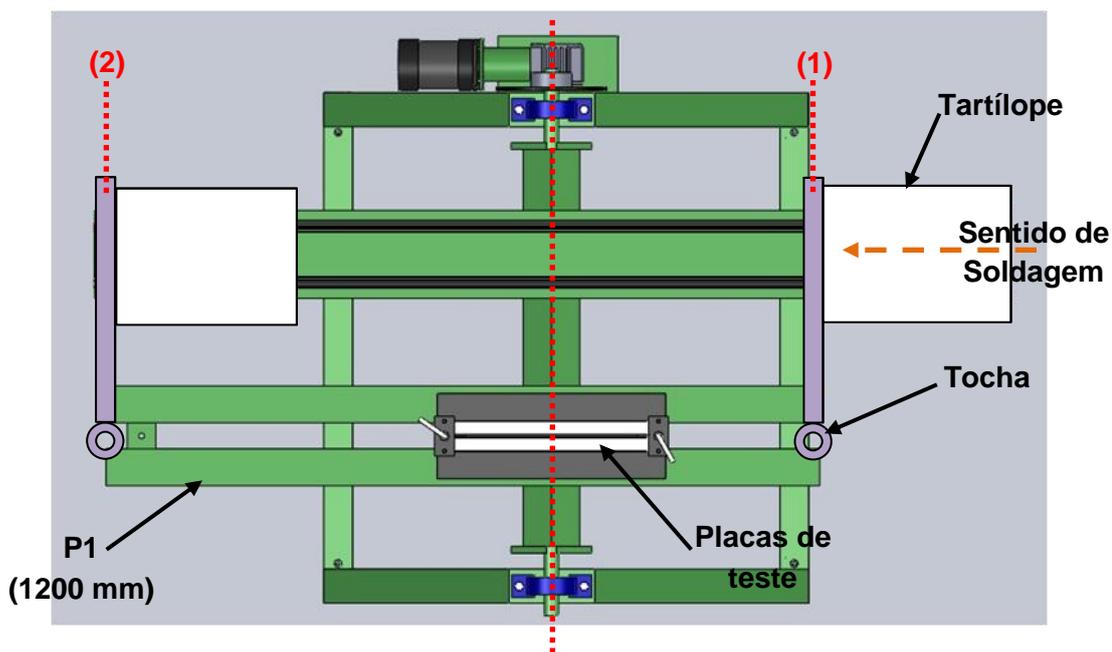


Figura 3.10 – Esquema da disposição do Tartílope e das placas de teste

Das Fig. 3.9 e 3.10, pode-se entender que o funcionamento do simulador se dá da seguinte forma: com um conjunto de parâmetros de soldagem selecionados, comprimento calculado de chapas planas e fixadas na base P1, e com a tocha posicionada pelo Tartílope no ponto inicial de soldagem (1), na posição plana, o processo de simulação é inicializado. Um motor de corrente contínua é alimentado por uma fonte regulada por um potenciômetro, com controle de malha fechada para manter as rotações constantes (Magalhães, 2011), que dará um valor de velocidade angular, previamente calculada, transmitindo por meio de dois sistemas mecânicos de redução, movimento rotacional ao eixo excêntrico P3, girando com isso o conjunto de soldagem (Tartílope, tocha e placas de teste). No momento em que o motor CC começa a funcionar, um dispositivo que liga ao mesmo tempo a fonte de soldagem e o Tartílope é acionado, fazendo com isto que o Tartílope desloque a tocha realizando a soldagem reta nas chapas planas, com uma velocidade de soldagem determinada, enquanto o conjunto gira. Essa rotação resulta na mudança de posição da tocha a cada instante, desde a posição plana (0°) até a posição sobrecabeça (180°), como acontece numa soldagem circunferencial convencional e representado na Fig. 3.8b. A Fig. 3.11 mostra o simulador construído e montado com os acessórios pronto para funcionamento.

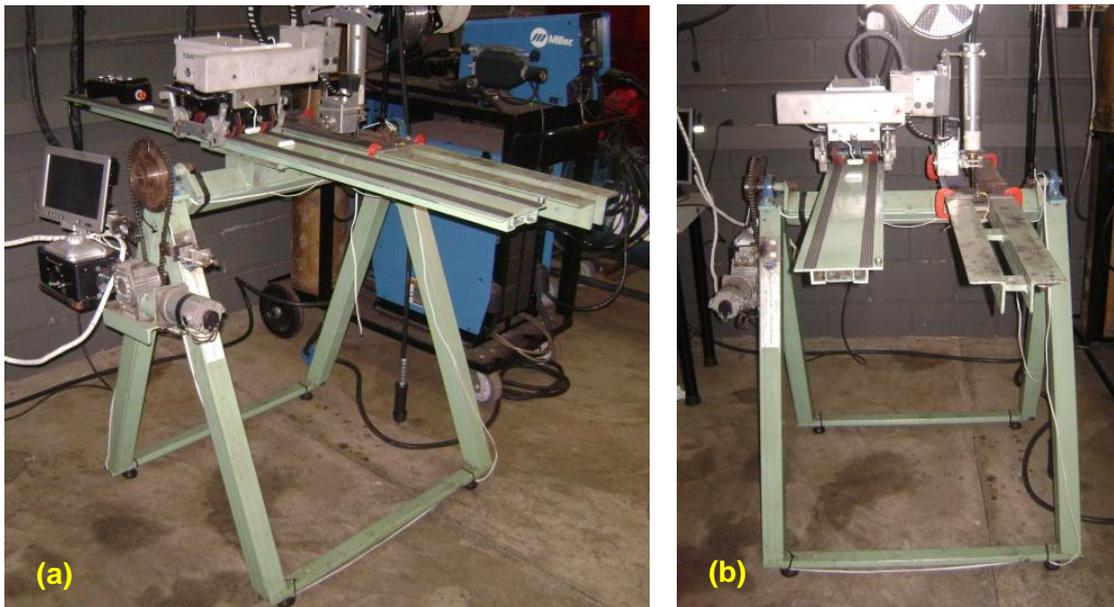


Figura 3.11 – Simulador construído e montado em vista: (a) isométrica e (b) frontal

3.2.3 – Considerações de Construção do SDR

Para que o processo de simulação, realizado pelo simulador, seja equivalente a uma soldagem circunferencial convencional, as considerações a seguir são essenciais:

- O comprimento das chapas planas ou placas de teste deve ser equivalente ao comprimento do arco de circunferência correspondente ao valor do ângulo do arco θ que vai ser soldado.
- O tempo (t) utilizado para realizar a soldagem de um tubo em um determinado ângulo, deve ser o mesmo tempo utilizado para soldar o comprimento total das chapas planas, assim como também o mesmo tempo que o simulador demorará em girar θ graus.

Com estas considerações e para garantir um controle dos parâmetros no funcionamento do simulador, uma formulação matemática é apresentada usando-se fórmulas de movimento circular uniforme.

Para soldar uma chapa plana de comprimento S [cm] com uma determinada velocidade de soldagem, V_{sold} [cm/min], é gasto um tempo t [min], então:

$$t = \frac{S}{V_{sold}} \quad (1)$$

Se considerar que o comprimento S da chapa seja o mesmo S a ser soldado em tubo (Fig. 3.12), então, S seria o comprimento do arco de circunferência correspondente ao valor do arco θ [graus] que vai ser soldado, assim:

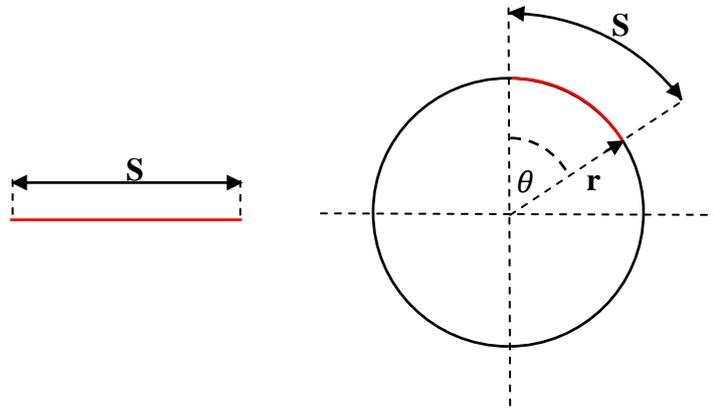


Figura 3.12 – Comprimento S na chapa e no tubo, que devem ser iguais para que a soldagem de simulação tenha as mesmas características da soldagem convencional

$$S = r\theta \quad (2)$$

O valor de θ [graus] deve ser convertido em radianos para que S tenha unidades em cm, logo,

$$S = r\theta\left(\frac{\pi}{180^\circ}\right) \quad (3)$$

Também:

$$\omega = \left(\frac{\theta}{t}\right) \quad (4)$$

Onde ω representa a velocidade angular [rpm] com que o eixo excêntrico deve girar um tempo t o comprimento θ , para que o processo de simulação tenha as mesmas características que uma soldagem circunferencial convencional.

O motor de corrente contínua fornecerá a velocidade angular necessária com a qual o eixo excêntrico deverá girar de tal forma que, o tempo que o simulador gire desde 0° até 180° (Fig. 3.8b) seja igual ao tempo de soldagem no comprimento total da chapa plana, como exemplo. Para isto, este motor de corrente contínua fornecerá o movimento rotacional ao eixo

excêntrico por intermédio de duas reduções: uma caixa de redução mecânica e outra redução por engrenagens e pinhões. O sistema de redução é mostrado na Fig. 3.13.

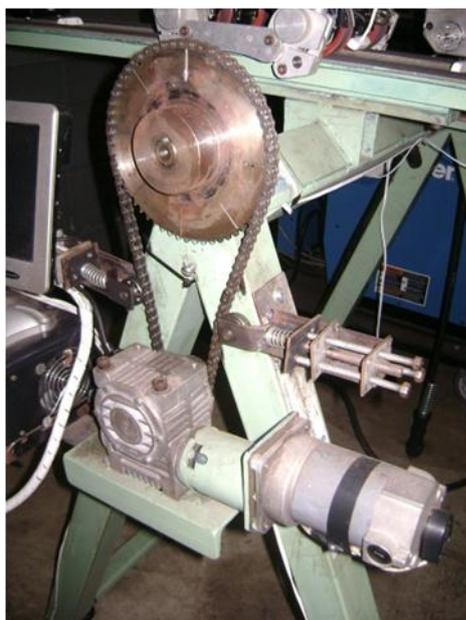


Figura 3.13 – Detalhe do motor de corrente contínua e dos sistemas de redução que fornecem o movimento rotacional ao eixo excêntrico

Para um melhor controle das revoluções de giro no eixo excêntrico do SSDR, Magalhães et al. (2011) desenvolveram um sistema de controle, em malha fechada, da velocidade de saída do motor de corrente contínua utilizando um encoder no eixo do motor, antes da saída. Um potenciômetro, colocado na fonte, regula a alimentação do motor de corrente contínua, e mostra no display o valor equivalente da alimentação do motor, numa faixa de 0 – 3900 rpm, que o eixo excêntrico deverá girar.

Assim, para encontrar a relação entre a alimentação regulada pelo potenciômetro no motor de corrente contínua e as rpm no eixo excêntrico, foram realizados testes impondo-se diversas velocidades ao motor e verificando-se quanto tempo a mesa levava para girar de 90° e 180°. Os resultados fornecem uma curva de calibração que relaciona a entrada através do potenciômetro com a saída em rotação da mesa em rpm, conforme a Fig. 3.14.

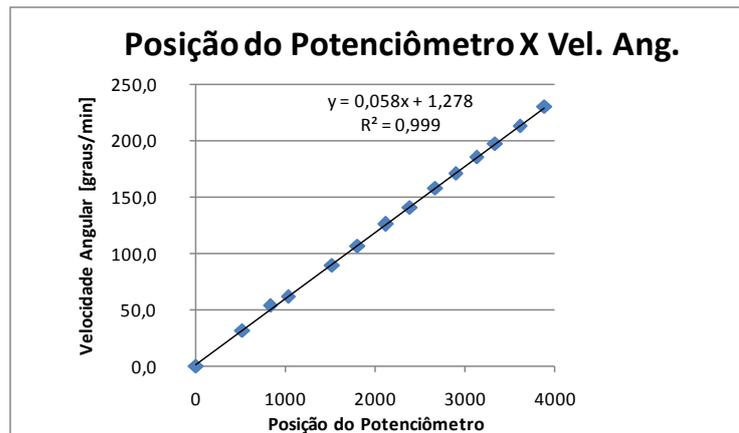


Figura 3.14 – Curva de calibração do simulador

Com a estrutura do SDDR já montada e sabendo-se a faixa de rotações no eixo excêntrico, a qual é garantida para ser constante, construiu-se uma tabela que fornece os parâmetros necessários para a realização do processo de soldagem de simulação para diferentes condições desejadas. Esta tabela deverá ter parâmetros de entrada e parâmetros de saída, assim:

- Parâmetros de entrada: Diâmetro do tubo que se quer simular, o ângulo θ que representa o comprimento do arco do tubo a ser soldado na simulação e a Velocidade de soldagem a ser utilizada.
- Parâmetros de saída: Comprimento S das placas de teste, o tempo t que o simulador precisa para girar os θ a serem soldados na simulação e que será o mesmo tempo utilizado para soldar S , o Rot-SDDR ou valor das rotações com o que o eixo excêntrico vai girar e o Rot-Pot ou valor que deve ser inserido, na fonte de alimentação, pelo Potenciômetro.

Assim, a Tab. 3.1, representa a tabela criada para melhor controle dos parâmetros do processo de simulação usados no SDDR.

Tabela 3.1 – Tabela de parâmetros de entrada e saída a serem considerados para um processo de simulação

Parâmetros de entrada			Parâmetros de saída			
Diâmetro do tubo [polegadas]	Tamanho a soldar [graus]	Velocidade de soldagem [cm/min]	Comprimento das chapas [cm]	Tempo de soldagem [min]	Rotações do Simulador [graus/min]	Rotações no Potenciômetro [rpm]
8	180	30	31.92	1.06	169	2856

3.2.4 – Outras considerações

O SDR como um sistema, poderá realizar soldagens de simulação de qualquer tamanho de diâmetro de tubo, mas neste projeto ela apresenta dois tipos de limitações:

- Tamanho das placas de teste: estão limitadas a um valor máximo de 1200 mm e com isto limita o diâmetro do tubo a ser simulado até um valor de 30 polegadas, numa soldagem de 180°.
- Rotações do eixo excêntrico: o valor máximo de velocidade angular no eixo excêntrico é de 230 rpm, que é o equivalente aos 3900 rpm que o potenciômetro pode regular na fonte de alimentação do motor. Isto devido às limitações do motor utilizado e aos sistemas de redução adotados.

O simulador, aqui construído, pode realizar soldagem de simulação, de passe de raiz, pela parte interna ou externa do tubo, como explicado a seguir:

- Considerando a disposição do equipamento da Fig. 3.10, com o ponto (1) como início e o ponto (2) como final da soldagem nas chapas planas, e adotando-se o sentido de giro G1 do eixo excêntrico (Fig. 3.9), o SDR simulará um processo de soldagem circunferencial externo no sentido descendente, começando no ponto mais alto do tubo na posição plana e terminando no ponto mais baixo do tubo na posição sobrecabeça.
- Se adotar o sentido de giro G2 (Fig. 3.9), o SDR simulará um processo de soldagem circunferencial interno no sentido ascendente, começando na posição mais baixa do tubo na posição plana e terminando no ponto mais alto do tubo na posição sobrecabeça. Se o início do processo de simulação começar com o conjunto de soldagem (Tartílope, tocha e placas de teste), posicionado girado em 180° ao apresentado na Fig. 3.9, então, o processo de simulação circunferencial interno será no sentido descendente, começando na posição mais alta do tubo, posição sobrecabeça, terminando na posição plana, no ponto mais baixo do tubo.

Cabe ressaltar que, os bons resultados dos processos de simulação dependem, também, da parametrização do processo de soldagem a ser utilizado e não somente dos parâmetros utilizados no simulador.

3.3 – MÉTODO DO CHANFRO COM NARIZ INCLINADO

Um fator determinante para a realização de um bom passe de raiz é o formato da junta. Este formato determina qual procedimento de soldagem deverá ser utilizado para a realização deste passe, podendo apresentar duas variações: junta com abertura de raiz e junta sem abertura de raiz.

Em ambos os casos, diferentes problemas podem ser encontrados desde o momento em que as partes a serem soldadas são encostadas uma na outra, dando o formato final da junta que vai ser preenchida, a saber:

- Problemas de alinhamento.
- Dificuldades para manter a abertura de raiz constante ao longo das chapas ou do perímetro do tubo.
- Falta de fusão ou, do modo contrário, perfuração.
- Contaminação pelo cobre da cobre-junta, que é colocada ao redor do diâmetro interno do tubo, com o intuito de evitar vazamento do metal líquido da poça de fusão.
- Tempo gasto para a colocação da acopladeira dentro do tubo além do alto custo que resulta o aluguel deste dispositivo.

Nos laboratórios de pesquisa, um passe de raiz com boas características é conseguido por tentativa e erro, como apresentado anteriormente. Isto pode ser entendido por que não existe na literatura, uma metodologia que mostre como determinar uma configuração de junta, específica para atingir uma boa penetração no passe de raiz. Todas são apresentadas já definidas, com medidas próprias e com recomendações de valores de parâmetros de soldagem, isto é, corrente, tensão, velocidade de soldagem, etc, e em alguns casos, o mesmo formato com diferentes medidas. Cabe ressaltar que, metodologias de simulação computacional estão sendo utilizadas para obter informações de uma determinada configuração de junta, entre elas, verificar uma boa penetração.

Ante estes problemas, neste trabalho, é proposta uma metodologia que permite a construção de uma configuração de junta, especificamente, da espessura do nariz, com a qual se consegue realizar o passe de raiz sem utilizar cobre-junta, numa soldagem de topo e sem abertura de

raiz. Isto permitire realizar uma soldagem circunferencial pelo lado externo do tubo sem precisar de espaçador e nem cobre-junta. Considerou-se trabalhar com a mesma configuração de junta mostrada na Fig. 2.11d, para mostrar que a execução desta metodologia evita a contração do pequeno chanfro na parte inferior desta junta, diminuindo com isto o tempo gasto na usinagem desta parte da junta, assim como desalinhamento devido à menor complexidade do formato da junta. Nestes testes não se utilizou pré-aquecimento.

Foi entendido então que o fator chave para a construção desta junta é a espessura da face de raiz. Assim, considerando uma determinada condição de soldagem (parâmetros de soldagem), a face de raiz deverá ter a espessura suficiente para permitir uma fusão total, que possa manter aderida o estado líquido da poça de fusão ao metal de base sem ter vazamentos ou furar devido à pressão, e que permita um reforço aceitável na raiz do cordão após a solidificação, além de não apresentar defeitos internos.

Com isto, foi pensando que a soldagem deverá ser realizada numa junta que tenha a espessura de nariz variável, isto é, um formato inclinado que comece com um valor máximo, neste caso 4 mm, e termine num valor mínimo, 0 mm. Assim, esta metodologia foi denominada de “Método do chanfro de nariz inclinado”.

Chapas de aço ABNT 1020 de 25,4x10x130 mm foram utilizadas na fabricação das chapas de testes. O comprimento das chapas foi determinado de 130 mm com o intuito de poder realizar a fixação, entre elas, somente por pontos de solda nos extremos. Isto evita interferências ou defeitos que um ponto de solda pode originar quando colocado no meio do comprimento das chapas, quando da passagem do arco elétrico sobre a face do “nariz inclinado”, podendo modificar ou disfarçar resultados na determinação do ponto de penetração total após a deposição do cordão. Os 10 mm de espessura na chapa foi escolhido para poder analisar o comportamento da face de raiz do cordão dentro do chanfro, toda vez que a altura apróximada do cordão de passe de raiz é de 6 mm. Um comprimento maior pode requerer um ponto de solda no meio, para evitar a separação entre elas durante o processo de soldagem, o que interferiria nos resultados.

Com estes valores, o ângulo de inclinação do nariz variável (de 0 a 4 mm) é de 1,75°. A configuração final desta junta e mostrada na Fig. 3.15.

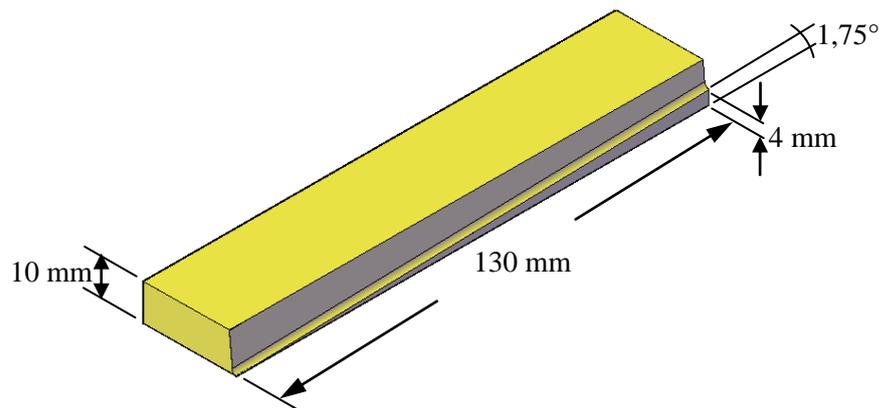


Figura 3.15 – Medidas da chapa com o nariz inclinado

A espessura variável do nariz foi medida nas espessuras de 1, 2, 3 e 4 mm, como mostrado na Fig. 3.16, e riscado estes pontos pela parte posterior das placas de teste com a finalidade de ter um melhor controle da espessura do nariz em cada ponto ao longo da junta, mostrado na Fig. 3.17.

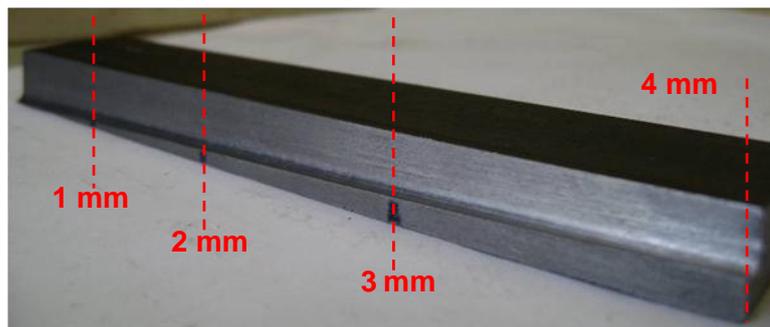


Figura 3.16 – Nariz variável ao longo do comprimento do metal de base

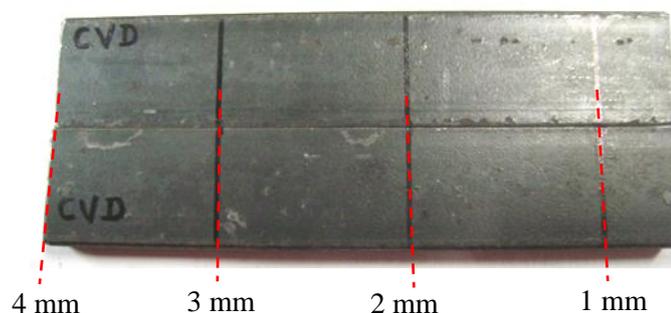


Figura 3.17 – Linhas riscadas na parte inferior da junta, mostrando a espessura de nariz nesses pontos, para maior controle

As placas de testes já prontas, com o chanfro inclinado, são mostradas na Fig. 3.18.

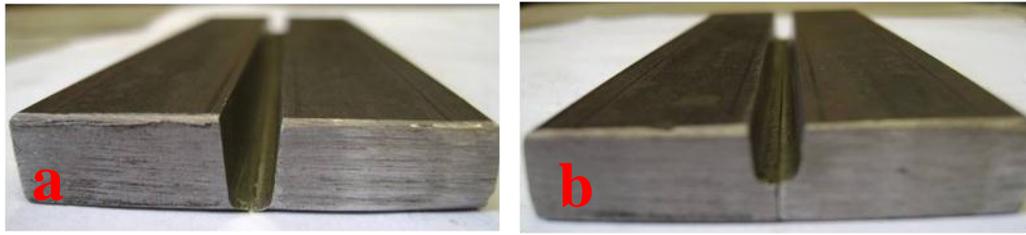


Figura 3.18 - Disposição final da junta com a altura do nariz variável, com valores de: (a) 0 mm e (b) 4 mm

Nesta junta, a realização da soldagem começa no ponto mais alto (4 mm) e termina no ponto mais baixo (0 mm). Assim, durante o percurso da soldagem e em algum determinado ponto, a fusão total do nariz será conseguida, o que será visível pelo lado oposto da junta. Desta forma, neste ponto de fusão total, por uma simples relação de triângulos se determina a espessura do nariz para essa condição de soldagem, que permite realizar o passe de raiz sem utilizar cobre-junta.

Uma representação esquemática de como a metodologia funciona, em soldagem na posição plana, é apresentada na Fig. 3.19, e detalhada a seguir:

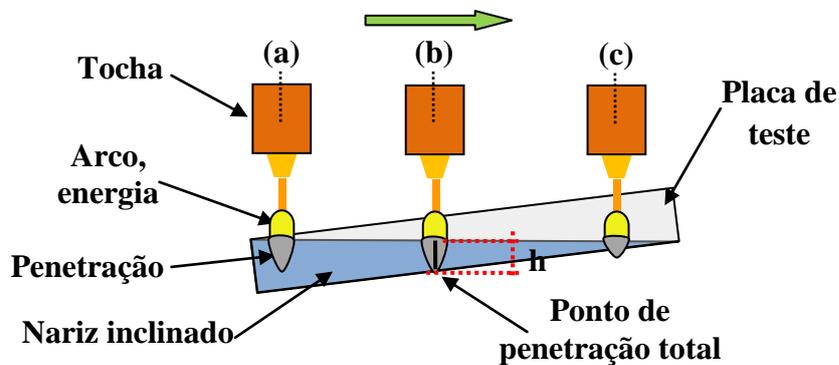


Figura 3.19 – (a) Ponto de início da solda representando um tamanho de penetração obtido com uma determinada energia e (b) ponto de penetração total onde o tamanho “h” é a espessura de nariz encontrado para essas condições

As chapas de teste pontas, como mostrado na Fig. 3.18, são fixadas e posicionadas no “suporte” de tal forma que o nariz inclinado da junta fique com a face (parte superior) numa posição perpendicular ao deslocamento da tocha (Fig. 3.19), isto com o intuito de evitar

induzir maior escorregamento ou queda do metal líquido da poça, originado por uma inclinação maior, o que origina defeitos e dificulta a penetração.

Com a tocha posicionada no ponto (a), considerando uma soldagem plana (Fig. 3.19), o arco é aberto com determinados parâmetros de soldagem. Os parâmetros de corrente e tensão (I e U) fornecem uma energia que origina uma determinada penetração no ponto onde o arco atua (Fig. 3.19a). Assim o processo de soldagem é realizado movimentando a tocha desde a posição (a) até a posição (c). Durante este processo de soldagem, em algum ponto do percurso, a fusão total do nariz é conseguida atingindo com isso a penetração total (Fig. 3.19b).

A seguir, foi verificado pela parte oposta da deposição do cordão, raiz da junta, o ponto onde a menor penetração total foi atingida. Foi medida, então, a distância deste ponto a uma das linhas riscadas na chapa de teste (Fig. 3.17), linhas entre as quais se encontra o ponto de penetração total. Assim, conhecendo-se o valor da distância entre as linhas, o valor da distância de uma linha até o ponto de penetração total e conhecendo-se o valor do ângulo do nariz inclinado, a espessura ou altura de nariz “ h ”, com a qual se consegue a penetração total, pode ser determinada por um simples cálculo de relação de triângulos.

A execução deste procedimento nas 3 posições críticas da soldagem circunferencial, resultou em 3 diferentes pontos de penetração total que se reflete em 3 espessuras de nariz diferentes, isto devido ao efeito que a posição de soldagem ocasiona na poça de fusão e nas forças que ajudam no destacamento da gota, especificamente a força de gravidade. Teve-se cuidado de manter a face do “nariz inclinado” na posição horizontal ou vertical, sempre perpendicular ao deslocamento da tocha, isto com o intuito de evitar induzir escorregamento do metal líquido durante a soldagem. A Fig. 3.20, esquematiza estes posicionamentos.

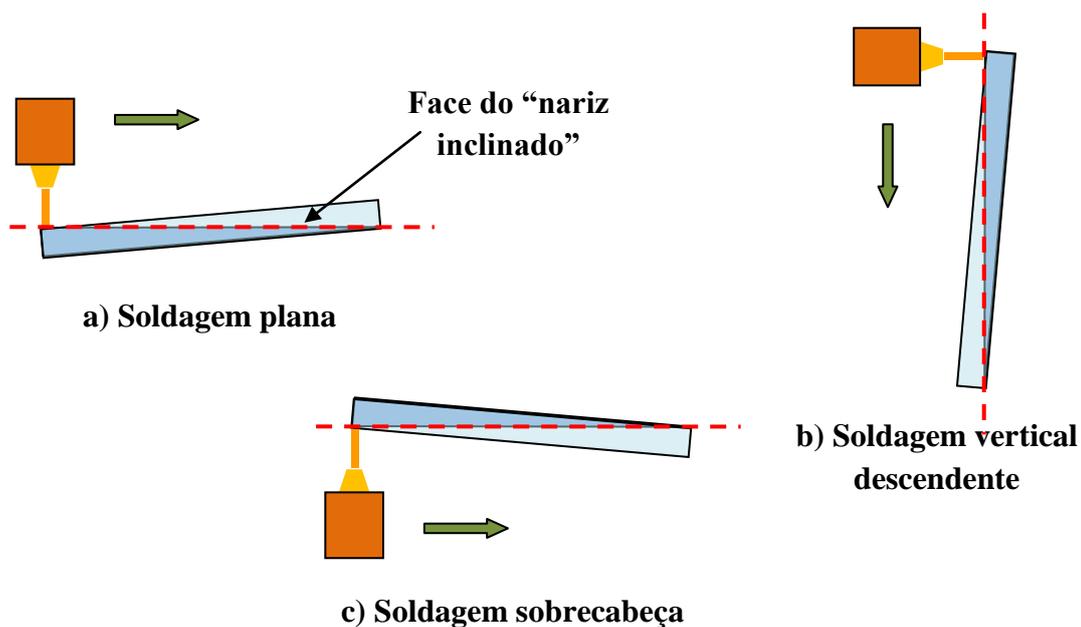


Figura 3.20 – Posicionamento das chapas de teste com a superfície do “nariz inclinado” perpendicular ao deslocamento da tocha nas 3 posições testadas

Ante isto, foi considerada como válida a menor espessura de nariz encontrada, toda vez que esta espessura é conseguida também nas outras duas posições, não sendo a recíproca verdadeira. A saber, a espessura mínima de nariz ou a menor penetração sempre foi encontrada na soldagem vertical descendente, isto como consequência do escorregamento da poça de fusão, que interfere entre o arco e o metal de base, diminuindo com isso o efeito de penetração. Este procedimento foi realizado para todos os processos de soldagem utilizados neste trabalho.

Em seguida, chapas de teste foram usinadas considerando-se uma espessura de nariz constante igual à espessura de nariz encontrada e a soldagem de passe de raiz foi realizada obtendo-se a penetração total esperada. Uma análise visual seguida de um ensaio metalográfico com bons resultados validou o procedimento. Chapas de aço ABNT 1020 de 25,4x10x250 mm foram utilizadas para esta etapa. Nestes testes não foi usado pré-aquecimento nas chapas.

4 – METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia usada para a realização dos testes é apresentada neste capítulo considerando a sequência mostrada na Fig. 1.1, desde a 1^a até a 4^a etapa, para cada um dos processos de soldagem usados neste trabalho. Assim, os objetivos e a metodologia de cada etapa são detalhados a seguir.

4.1 – METODOLOGIA

4.1.1 – 1^a Etapa – Parametrização com cobre-junta

O objetivo desta etapa é encontrar os parâmetros apropriados, sob condições impostas, com os quais se possa realizar um cordão de solda de passe de raiz com boas características físicas e visuais, isto é, bom aspecto visual na face do cordão sem defeitos como humping, desvios de cordão, mordeduras, entre outros, e que o reforço da raiz apresente penetração total e homogênea ao longo do cordão, além de não apresentar defeitos internos como porosidades, inclusões nem falta de fusão.

Assim, este trabalho começou com a decisão de usar “chanfro estreito” como configuração de junta a ser utilizada para a união dos tubos, como mostrado na Fig. 2.11d. Este tipo de chanfro requer menos metal de enchimento o que se reflete em menor requerimento de energia, menos tempo gasto no preenchimento da junta, reduzindo com isto as distorções e o tempo de soldagem, entre outros. Não se encontrou informação sobre o formato ou construção dessa junta, mas pode-se dizer que é uma junta de chanfro estreito, onde cada uma das duas partes tem um formato de chanfro em “J”, com 5° de inclinação na parte superior, com um arco de raio de 2,3 mm para evitar defeitos em quinas quadradas, e que encostadas uma na outra, oferecem um formato em “U”. O conjunto tem um rasgo ou pequeno chanfro em “V” em 75°, na parte inferior, para facilitar a fusão do nariz e sendo necessário usar cobre-junta, talvez com intuito de preencher essa parte inferior, além de evitar vazamentos do metal fundido no momento da soldagem.

Foram usadas chapas de aço ABNT 1020 com dimensões de 250x25,4x6,3 mm. A espessura de 6,3 mm foi escolhida com o intuito de evitar o desperdício de material, toda vez que com esta espessura se atinge a altura do cordão de passe de raiz recomendado na literatura.

Tendo em conta as limitações, falta de chanfradeira, para a construção dessa junta foi utilizada uma plaina e uma ferramenta de aço rápido para a construção da junta escolhida. Assim, foi necessário então preparar a ferramenta de aço rápido num formato similar ao do chanfro e, para se ter um melhor controle das medidas na fabricação da junta, foi utilizado um “calibre” como medida padrão. Considerando que no “calibre” não existe um raio de 2,3 mm, usado na Fig. 2.11d, foi considerado o valor do raio de 2,5 mm. Na Fig. 4.1, é mostrado o formato final da ferramenta utilizada.

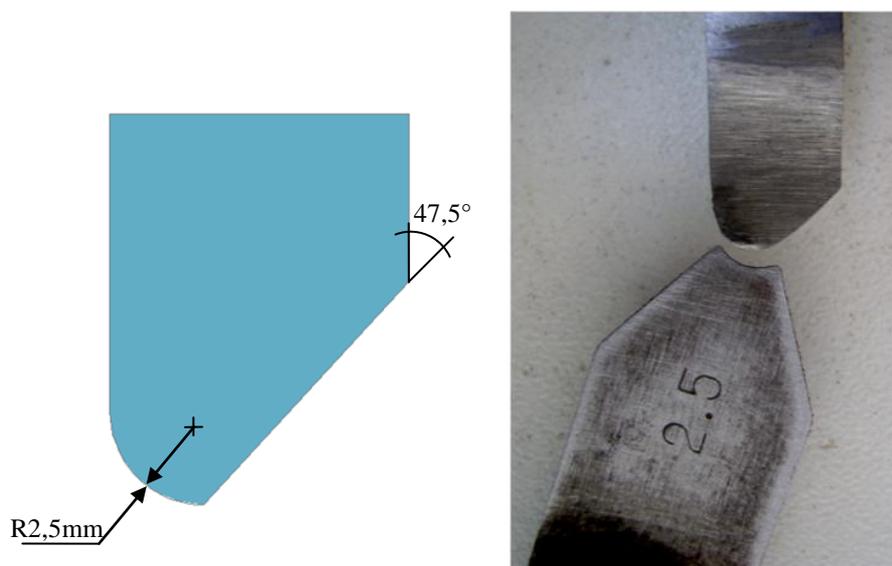


Figura 4.1 – Formato da ferramenta de aço rápido utilizada na fabricação da junta

Com isto, as dimensões finais da junta, para esta 1ª etapa, são mostradas na Fig. 4.2, e será utilizada para todos os testes e processos de soldagem.

Para conseguir usinar os 5° de inclinação do chanfro na junta da chapa, foi preciso girar a morsa que fixa a chapa no momento da usinagem. O ângulo de 75°, na raiz da junta, foi conseguido preparando o outro lado da ferramenta com um ângulo de 47,5° (Fig. 4.1), permitindo com isto atingir os 37,5° de inclinação, necessário em cada chapa. Estes detalhes de construção são mostrados na Fig. 4.3.

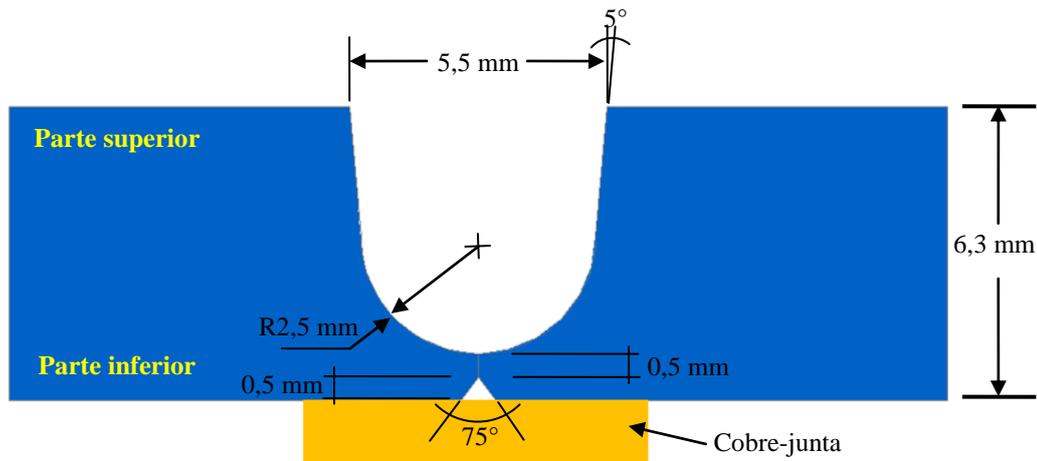


Figura 4.2 – Dimensões da junta utilizada na etapa de parametrização

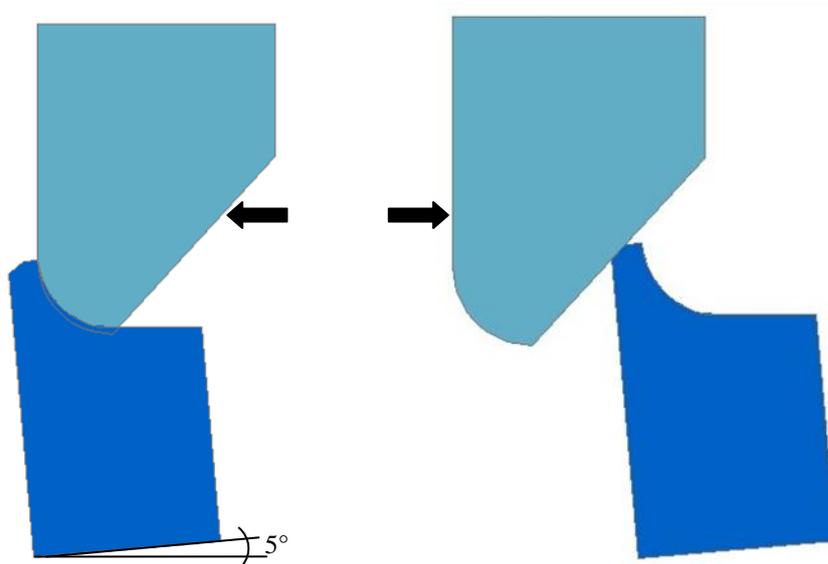


Figura 4.3 – Diagrama do posicionamento da chapa e a ferramenta durante o processo de usinagem para a conformação da junta

Depois de terminada a usinagem das chapas, com o formato de junta desejado, as chapas são fixadas uma na outra por 3 pontos de solda, um em cada extremo e um no meio, pela parte inferior das chapas. Os pontos de solda, que servem de fixação, foram lixados para eliminar o ressalto dos pontos, com o intuito de que a parte inferior da chapa fique o mais plana possível, para evitar desalinhamentos quando apoiadas na cobre-junta.

Com as placas de testes já prontas, se procedeu à realização de um cordão de passe de raiz considerando-se parâmetros encontrados na literatura para o processo STT (Siewert, et. al. 2008). O cordão depositado resultou ser muito estreito, sem preenchimento da junta. Diante disso, decidiu-se considerar dois fatores principais para este trabalho: em primeiro lugar, uma taxa ou relação de deposição que consiga um bom preenchimento da junta, no passe de raiz, considerado na literatura entre 4 e 6 mm, e em segundo lugar, considerar uma velocidade de soldagem de 30 cm/min, acima da normalmente encontrada na literatura, 15 cm/min, com o intuito de aumentar a produtividade.

Então, sabendo-se que a taxa de deposição (T_d) é modificada variando-se a velocidade de soldagem e/ou a velocidade de alimentação ($T_d = V_{al}/V_{sold}$), e tendo-se como ponto de partida a $V_{sold} = 30$ cm/min encontrou-se que com uma $V_{al} = 4,5$ m/min se consegue um preenchimento total do chanfro, como mostrado mais adiante em ensaios de macrografia. Portanto, a relação da taxa de deposição é: $T_d = 15$. Este valor foi mantido constante para todos os processos de soldagem e independe de outros parâmetros em cada processo. Os processos de soldagem que foram utilizados neste trabalho são os processos por curto circuito derivativo: STT, CMT e RMD e o processo por Curto Circuito Convencional.

Em seguida, testes foram realizados com deposição de cordão sobre chapas, na posição plana, para encontrar o envelope de trabalho, faixa entre valores mínimo e máximo dentro dos limites de regulagem de cada uma das variáveis de soldagem, que as fontes permitem regular, com a qual se consegue uma boa transferência, estável e constante, baixo respingo e por tanto um cordão com boas características visuais. Estes limites foram usados como níveis das variáveis (parâmetros reguláveis da fonte) para montar um planejamento experimental, ferramenta usada para poder realizar os experimentos ou corridas de uma forma mais ordenada e rápida com cada um dos processos de soldagem. Assim, foi montada uma tabela para cada processo.

Durante a soldagem circunferencial a tocha se desloca sobre o perímetro do tubo, mudando de posições ao longo do perímetro do tubo, como detalhado e mostrado na Fig. 2.24, fazendo com que as forças que agem no destacamento da gota sofram alterações a cada instante ao longo desta soldagem. Dentro destas posições, as posições: plana, vertical e sobrecabeça são as posições mais críticas ou diferenciadas, onde a força da gravidade é a força com maior

influência no destacamento da gota. Considerando isto, fizeram-se testes de parametrização dos processos, isto é, encontram-se os parâmetros apropriados para cada um dos processos de soldagem utilizados, com os quais se consegue realizar o passe de raiz, em chapa plana e com a configuração de junta já apresentada, com boas características visuais e sem defeitos internos, em cada uma das três posições de soldagem mencionadas. Teve-se como alvo que estes parâmetros deveriam ser os mesmos para estas três posições, isto com o intuito de, posteriormente, realizar a soldagem circunferencial sem precisar modificar nenhum dos parâmetros de soldagem.

Um dispositivo denominado “Suporte para soldagem automatizada em diferentes posições”, denominado somente de “suporte”, foi construído para ajudar na fixação e posicionamento das chapas para realizar a soldagem plana, vertical descendente e sobrecabeça. Este “suporte” permitiu diminuir o tempo gasto na fixação e posicionamento das chapas e permitiu maior repetibilidade. A concepção e construção deste suporte foram discutidas no Capítulo III.

Com as tabelas dos planejamentos experimentais montadas, foram realizadas as corridas nas três posições de soldagem a serem testadas, considerando-se uma repetição em cada corrida. Para se ter um melhor controle das corridas para análise dos cordões, as placas foram codificadas da seguinte forma:

- Foi considerada a primeira letra do processo sendo utilizado, assim: S = STT, C = CMT, R = RMD e CC = Curto Circuito Convencional;
- As posições de soldagem foram nomeadas como: P = Posição plana, VD = Posição vertical no sentido descendente e SC = Posição sobrecabeça;
- O número 1 representará a primeira repetição, considerando-se que será realizada uma repetição.

Com isto, o código SSC-1 representa a uma soldagem com o processo STT, na posição sobrecabeça, sendo o número 1 a primeira repetição.

Posteriormente, foi realizada uma análise visual de cada cordão realizado com o intuito de aceitá-lo ou rejeitá-lo. Assim, um bom cordão deve ter uma face de levemente convexa até levemente côncava, e deve apresentar penetração total, que se reflete na fusão da face da raiz ou nariz com o preenchimento do rasgo de 75° na raiz da junta. Defeitos como falta de

penetração, mordeduras, humping, entre outros, em qualquer uma das posições de soldagem foi motivo de descarte da corrida respectiva. Assim, a corrida que forneceu os cordões sem defeitos, nas 3 posições testadas, foi considerada como a corrida apropriada de usar na soldagem, com as condições impostas, neste trabalho. Um ensaio de macrografia foi realizado nos cordões obtidos com os parâmetros da corrida selecionada, para verificação da existência ou não de defeitos internos.

4.1.2 – 2ª Etapa – Proposta de metodologia para junta sem cobre-junta

O objetivo desta etapa é executar e validar uma metodologia, com a qual se pode determinar uma espessura de face de raiz ou nariz, apropriada para um determinado conjunto de parâmetros de soldagem, que permita realizar cordões de solda de passe de raiz em junta de topo, sem abertura de raiz e sem a utilização de cobre-junta, com boa penetração e sem defeitos internos. Esta metodologia foi apresentada em detalhe no capítulo anterior.

As chapas de testes, com chanfro inclinado, foram preparadas seguindo o procedimento detalhado no capítulo anterior, fixadas e posicionadas no “suporte”, como mostrado na Fig. 3.6, e com os parâmetros das corridas apropriadas encontrados na 1ª etapa, para cada processo, a soldagem foi realizada nas três posições estudadas, considerando-se uma repetição para cada caso.

Após realizada a soldagem, foi encontrado o ponto onde se teve penetração total e posteriormente determinada a espessura de nariz correspondente a este ponto, como explicado no item 3.3. A menor espessura de nariz encontrada será a espessura válida a ser utilizada.

A seguir, com a espessura de nariz determinada, foram preparadas as novas juntas em chapas de aço ABNT 1020 de 250x25,4x10 mm, que finalmente são as juntas com as quais se pode realizar a soldagem em todas as posições, em junta de topo, sem usar cobre-junta e com um cordão sem defeitos internos, para as condições de soldagem impostas neste trabalho. A nova configuração da junta é mostrada na Fig. 4.4, considerando-se desta vez a espessura de nariz encontrada, “**h**”, para cada um dos processos de soldagem.

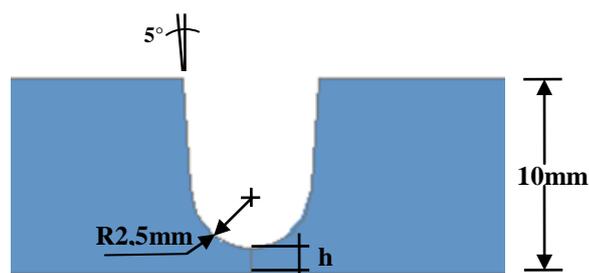


Figura 4.4 – Configuração final da junta onde “h” é o valor de nariz encontrado, para cada processo de soldagem, com a metodologia do chanfro inclinado

Cordões com boas características visuais foram conseguidos, com este formato e nas três posições. Ensaios de macrografia foram realizados, verificando cordões sem defeitos internos. Com isto, a metodologia apresentada foi validada.

4.1.3 – 3ª Etapa – Simulador de Soldagem de Dutos por Retificação (SSDR)

Nesta etapa será realizada a simulação física de um tubo de 8 polegadas de diâmetro, numa soldagem de 180°, para duas configurações de junta, uma que usa cobre-junta e a outra que não usa cobre-junta. A concepção e construção do SSDR foi apresentada no capítulo anterior.

Assim, com o “simulador” já construído, foram determinados os parâmetros para o processo de simulação. Para isto foram inseridos os valores de entrada na “Tabela de parâmetros do SSDR”: o diâmetro do tubo a ser simulado, o comprimento da soldagem em graus e a velocidade de soldagem. Como valores de saída se têm: comprimento da chapa de teste, o tempo gasto na soldagem da chapa, o valor da velocidade angular [rpm] com que o eixo excêntrico do “simulador” deve girar durante a soldagem e o valor das rotações que deve ser colocado no potenciômetro para que o eixo gire com a velocidade determinada, devido à relação de transmissão existente no sistema. A Tab. 4.1, mostra os valores dos parâmetros para o processo de simulação. Foi adicionado ao comprimento da placa de teste 10 mm, como mostrado na mesma tabela, para considerar uma soldagem que comece com 5° antes da posição plana tentando vencer a inércia do sistema, a abertura e a estabilização do arco de soldagem. Também se adicionou 30 mm para motivos de fixação das placas de teste.

Tabela 4.1 - Tabela de parâmetros de entrada e saída do “simulador” a ser usada neste trabalho

Parâmetros de entrada			Parâmetros de saída			
Diametro do tubo [polegadas]	Tamanho a soldar [graus]	Velocidade de soldagem [cm/min]	Comprimento das chapas [cm]	Tempo de soldagem [min]	Rotações do Simulador [graus/min]	Rotações no Potenciômetro [rpm]
8	180	30	31.92	1.06	169	2856
8	185	30	32.81	1.09	169	2856

As chapas de teste de 360x25,4x10 mm foram preparadas para uma primeira simulação, conforme configuração de junta que usa cobre-junta (Fig. 4.2), e uma segunda simulação com formato de junta que não usa cobre-junta (Fig. 4.4). Cabe ressaltar que a simulação para cada um dos processos, foi realizada tendo em consideração a espessura do nariz encontrado para esse respectivo processo. Assim, os parâmetros de soldagem são os considerados apropriados para cada processo, encontrados na 1ª etapa. Em cada caso, uma repetição foi realizada.

Após a realização das soldas, foi realizado um ensaio de macrografia, nas seções transversais das posições plana, vertical e sobrecabeça para os dois processos de simulação. Para isto, os corpos de prova foram obtidos de pontos onde a tocha fica nestas posições durante o processo de simulação, como se fossem as posições de uma soldagem circunferencial. A localização destes pontos está representado na Fig. 4.13. Os cordões bem sucedidos e sem defeitos, após este ensaio, validaram o “simulador”.

4.1.4 – 4ª Etapa – Soldagem Circunferencial de Tubo de Aço API 5L-X65

O objetivo desta etapa foi validar os resultados obtidos nas 1ª, 2ª e 3ª etapa, aplicando-os na soldagem em tubos.

A norma API 1104 (2000), não indica nenhum tipo de corpos de prova para testes de passe de raiz, mas sim para testes destrutivos com o preenchimento total da junta. Assim, segundo esta norma, os corpos de prova para testes destrutivos devem ser de aproximadamente 230 mm, com isto, o comprimento final de cada tubo para os testes neste trabalho foi de 115 mm.

A primeira dificuldade encontrada para preparar a junta foi a irregularidade do formato circunferencial o diâmetro interno do tubo e/ou da espessura da parede. Na soldagem em campo, esta irregularidade e a sua solução foi apresentada no item 2.5. Para o caso deste trabalho, sendo o comprimento final das seções de tubos de 115 mm, pensou-se fixar o tubo na castanha de um torno, posicionando-o de tal forma que o desalinhamento do formato oval, quando o tubo gire, seja mínimo. A continuação se procedeu a usinar a parte interna, de um lado do tubo, até uma medida onde se consiga um desgaste uniforme no diâmetro interno do tubo, como conseguido pelo *Counterboring Tool* (Fig. 2.33b). A seguir o tubo foi faceado ou usinado na área frontal transversal ao seu eixo longitudinal.

Após isto, o procedimento foi repetido pelo outro lado do tubo, sendo nesta fixação que foi construído o formato da junta, evitando, com isto, desalinhamento devido a uma nova fixação. Desta forma se conseguiu quase que totalmente um diâmetro interno homogêneo diminuindo o desalinhamento da parte interna do tubo, permitindo ter um maior controle na construção da espessura do nariz, desde a parte interna do tubo. Finalmente foi retirado o recobrimento de proteção do tubo. A espessura do tubo ficou então em um valor aproximado de 7,7 mm, toda vez que o diâmetro externo do tubo seguira tendo o formato oval inicial. A Fig. 4.5 mostra o tubo fixado e pronto para construção do formato da junta.



Figura 4.5 – Seção do tubo durante o processo de usinagem de uniformização do diâmetro interno e faceamento

Em seguida, a junta foi preparada de acordo com a Fig. 4.4. Para a construção da junta, usou-se novamente a configuração da ferramenta de aço rápido usada em chapas (Fig. 4.1), mas desta vez deslocada angularmente para atingir os 5° de inclinação. A Fig. 4.6 mostra a posição da ferramenta durante a construção do formato da junta e o tamanho do nariz desejado no tubo e a Fig. 4.7 mostra a seção do tubo já terminado após o processo de usinagem.

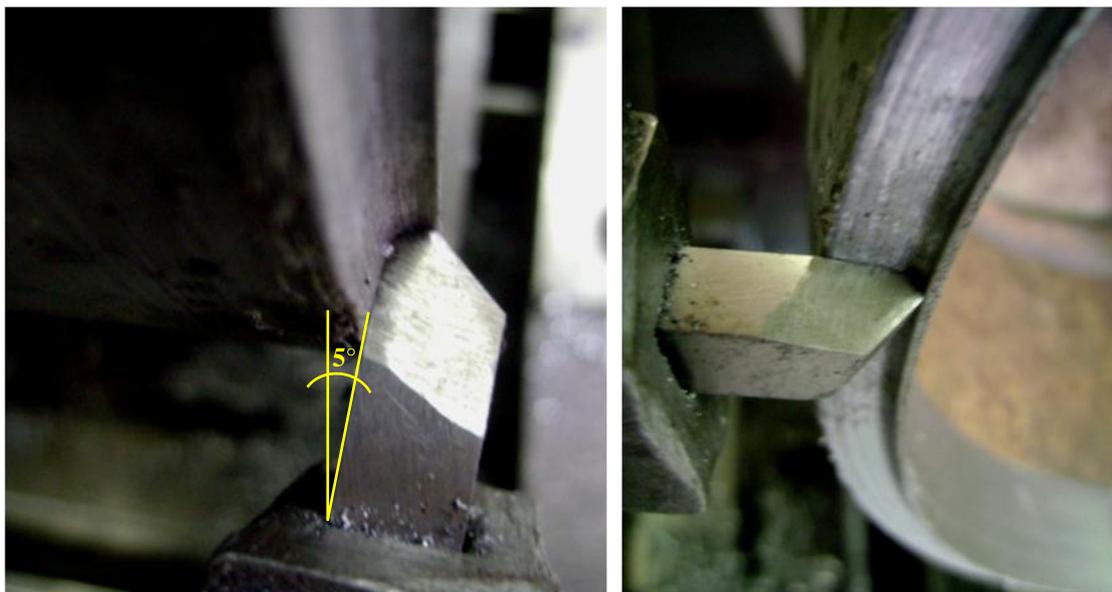


Figura 4.6 – Posição da ferramenta de aço rápido no ponto final da construção do formato da junta no tubo



Figura 4.7 – Seção de tubo a ser utilizado após as diversas etapas de usinagem

Os tubos foram fixados entre eles, por meio de uma peça de cantoneira com uma abertura entre abas suficiente para que a linha de escosto entre o tubos fique livre com o intuito de não interferir na penetração nem na formação da raiz do cordão, toda vez que foi percebido que, pelo menos em juntas com chanfro estreito, os pontos de solda ocasionam desvios do cordão após a passagem da tocha por esses pontos. A Fig. 4.8 mostra os tubos já prontos para a soldagem circunferencial, e os detalhes da união entre eles por meio das cantoneiras percebendo-se a ausência de “Hi-Lo”.



Figura 4.8 – Configuração final de tubos prontos para soldagem e detalhes da fixação e alinhamento entre eles

Após estas etapas, o tubo fica pronto para a soldagem com o formato da junta desejado, como mostrado na Fig. 4.9.

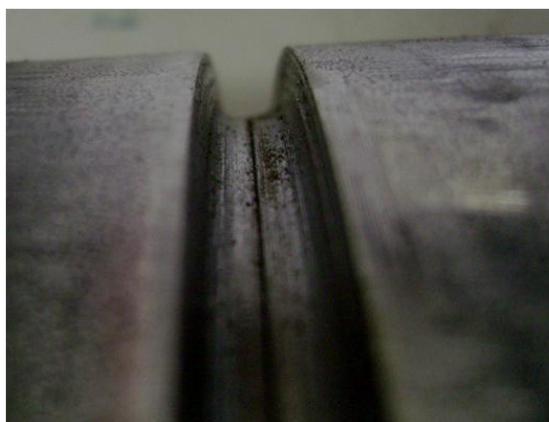


Figura 4.9 – Formato final da junta nos tubos

A seguir, os tubos foram fixados num dispositivo projetado para este fim. Este dispositivo tem uma seção de tubo do mesmo diâmetro do tubo a ser soldado, neste caso 8 polegadas, sobre o qual está fixada a cinta donde se desloca o Tartilope. De um lado, o tubo está apoiado e fixado numa parede e do outro lado foi montada uma castanha de torno que fixa, pela parte interna, o conjunto de tubos a soldar. Isto facilita a soldagem específica para tubos deste diâmetro, podendo ser trocados mais rapidamente, em conjunto de dois ou três anéis. A Fig. 4.10 mostra o sistema de fixação dos tubos.

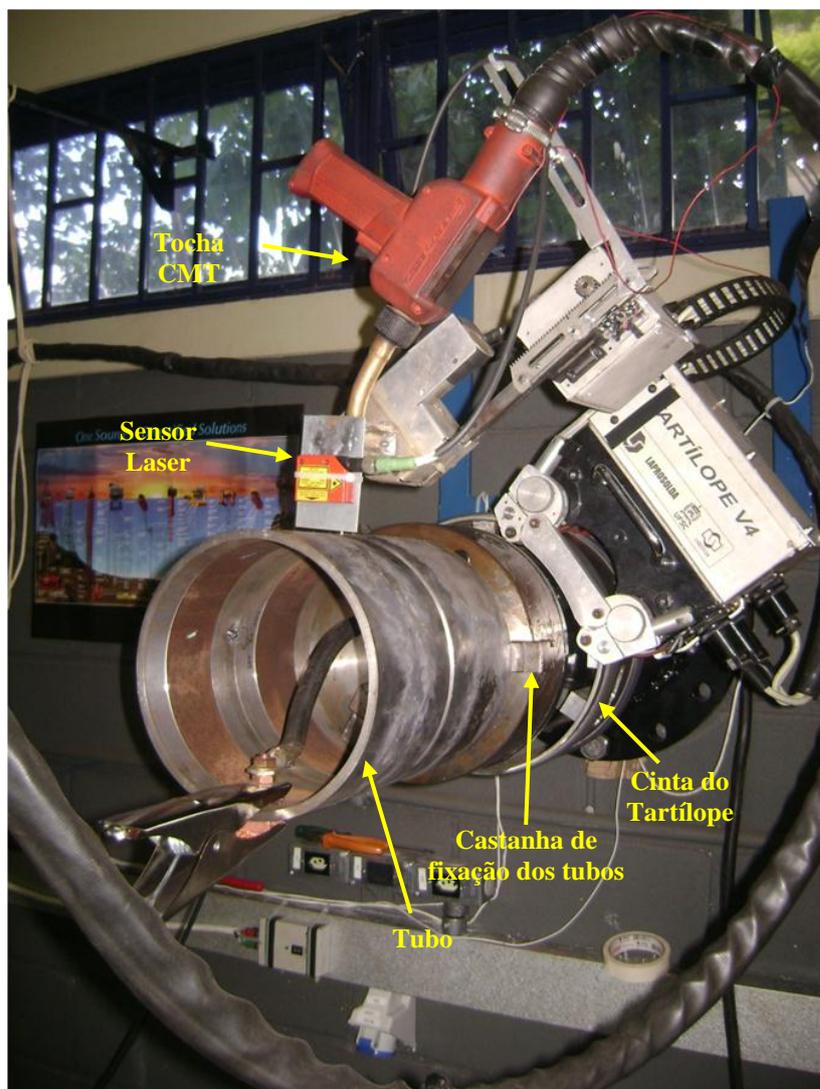


Figura 4.10 – Sistema de fixação de tubos para soldagem circunferencial

A Fig. 4.11 mostra o detalhe do posicionamento da tocha e o arame dentro do chanfro, pronto para o processo de soldagem.

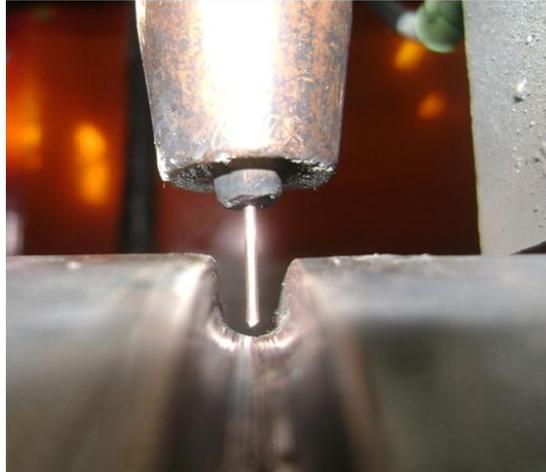


Figura 4.11 – Detalhe do posicionamento da tocha e do arame dentro do chanfro

Neste sistema, quando a soldagem é plana, a velocidade de soldagem necessária inserida é a mesma velocidade de deslocamento de Tartílope, mas, neste caso de soldagem circunferencial, o Tartílope se desloca sobre uma cinta de diâmetro maior ao diâmetro do tubo, isto faz, que a velocidade do arco ou velocidade de soldagem seja menor, como representado na Fig. 4.12. Com isto, é necessário fazer uma relação de velocidades entre a velocidade do Tartílope e a velocidade do arco (velocidade real de soldagem, neste caso).

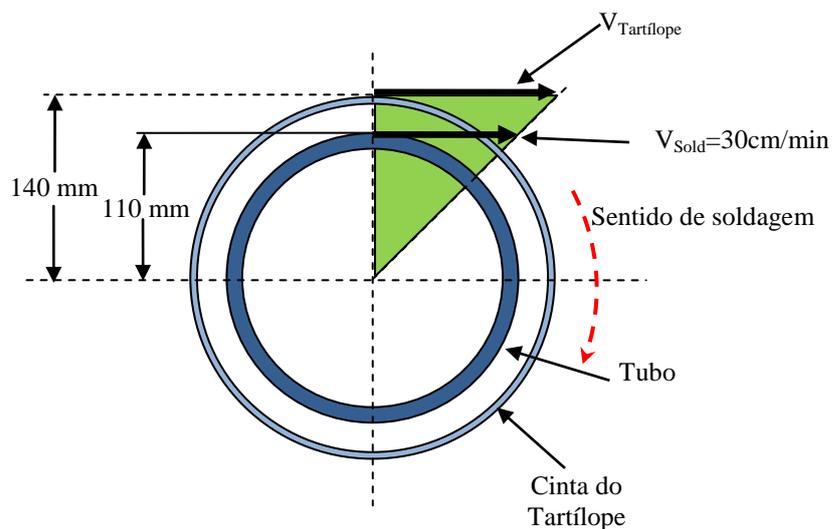


Figura 4.12 – Relação de velocidades entre a velocidade do Tartílope e a velocidade de soldagem

Considerando os valores mostrados na Fig. 4.12, e perante uma relação de triângulos, se determinou que a velocidade do Tartílope ($V_{\text{Tartílope}}$) será de 38,2 cm/min, que foi inserido no controle do Tartílope obtendo-se com isto uma velocidade de soldagem real de 30 cm/min.

Com todos os parâmetros e equipamentos prontos, a soldagem foi realizada em 180° por um lado, deixando esfriar o tubo para depois virar o conjunto de tubos e soldar o lado oposto, completando a soldagem circunferencial, e sempre com o deslocamento do Tartílope no sentido frontal. Nesta situação, são realizados dois cordões de solda sendo o segundo cordão considerado como uma réplica, para questão de análise, toda vez que é realizado com o mesmo procedimento e parâmetros para cada processo de soldagem.

Após a realização da soldagem foram retirados os corpos de prova dos tubos num corte transversal do cordão, para análise de macrografia, com comprimento aproximado de 30 mm (comprimento aproximado de 15°). Isto foi considerado devido a que dentro deste comprimento a posição da tocha pode-se ainda considerar nas posições planas, vertical e sobrecabeça. Para as posições plana e sobrecabeça, considerou-se uma defasagem de 5° após o começo e antes do fim da solda. A Fig. 4.13 mostra o posicionamento para extração dos corpos de prova.

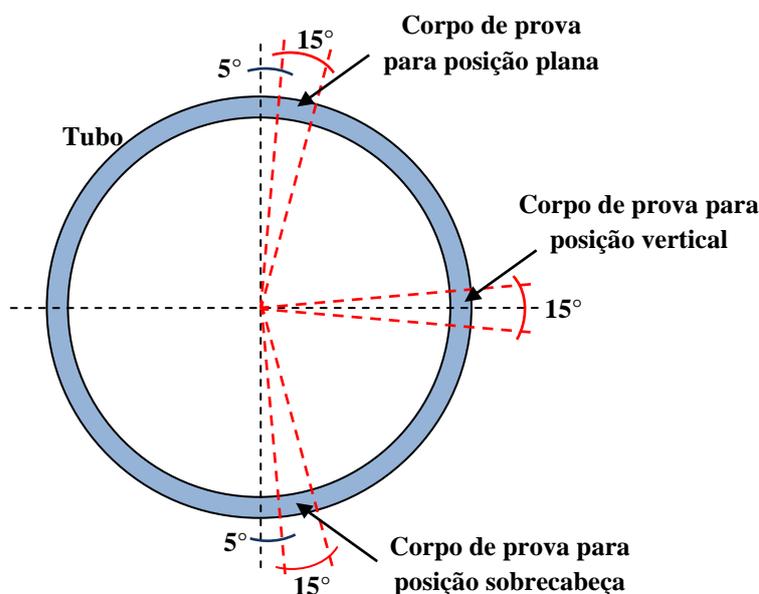


Figura 4.13 – Corte transversal no tubo, mostrando os pontos para extração dos corpos de prova para análise de macrografia

Esta mesma consideração foi tomada para a extração dos corpos de prova no processo de simulação. Cordões com bom aspecto na face, na raiz, com boa penetração e sem defeitos internos foram obtidos validando com isto o trabalho aqui desenvolvido.

4.2 – MATERIAIS

Os materiais de base usados neste trabalho foram chapas planas da 1ª a 3ª etapa, em diferentes comprimentos, sempre com largura de 25,4 mm, e tubos na 4ª etapa, como detalhados a seguir e segundo as etapas apresentadas na Fig. 1.1.

- **1ª Etapa:** Chapas de aço ABNT 1020 com 25,4x6,3x250 mm.
Chapas com espessura de 6,3 mm foram utilizadas com o intuito de poupar material, toda vez que essa espessura é suficiente para comportar uma altura de cordão de passe de raiz como encontrado na literatura (Fig. 2.14).
- **2ª Etapa:** Chapas de aço ABNT 1020 com 25,4x10x130 mm e 25,4x10x250 mm.
Na primeira parte desta etapa, chapas de 130 mm de comprimento foram utilizadas com o intuito de fixar as chapas somente por pontos de solda nos extremos sem precisar ponto de solda na metade do comprimento destas chapas, isto para evitar interferência no processo de penetração quando o cordão seja depositado. Altura de 10 mm foi considerada para poder analisar o comportamento da face do cordão dentro do chanfro. Já no segundo conjunto de chapas os 250 mm foram considerados para poder analisar melhor o cordão de solda após a estabilização do mesmo e numa soldagem mais comprida.
- **3ª Etapa:** Aço ABNT 1020 com 25,4x10x360 mm.
O comprimento da chapa para a simulação de 180° de um tubo de 8 polegadas de diâmetro equivale a 319,2 mm, mas foram adicionados 10 mm para começar a simulação 5° antes da posição plana e 30 mm para motivos de fixação, sendo então o comprimento final de 360 mm.
- **4ª Etapa:** Os tubos usados foram da série API 5L-X65 com 8” de diâmetro externo e 8 mm de espessura de parede, com um comprimento de 230 mm, considerando os dois anéis de tubos unidos.

Foi utilizado o arame eletrodo: AWS ER 70S-6 com diâmetro de 1,2 mm. O gás de proteção utilizado tem uma mistura de 75% Argônio + 25%CO₂, com uma vazão de 15 l/min.

4.3 – EQUIPAMENTOS

4.3.1 – Fonte e sistema de alimentação para processos STT e curto circuito convencional

Para a realização das soldas com estes processos, foi utilizada uma fonte eletrônica inversora, multiprocesso, da marca *Lincoln Electric*, modelo *Power Wave 450/STT*, com um alimentador de arame *Power Feed 10M* do mesmo fabricante, mostrada na Fig. 4.14. Esta fonte possui uma faixa de corrente e tensão de trabalho de 5 A/10 V até 570 A/43 V, tensão em vazio de 25 a 90 V, corrente máxima de 570 A e tensão máxima de 43 V com fator de trabalho de 60% e corrente máxima de 450 A e tensão máxima de 38 V com fator de trabalho de 100%. Para a realização dos testes com o processo STT, a fonte deve ser conectada, no polo negativo, num pino específico para este processo. Após isso, foi selecionado o programa 25, o qual permite o ajuste da velocidade de alimentação, a corrente de base, a corrente de pico e o Tail-Out. Para o processo de curto circuito convencional foi selecionado o programa 5 o qual permite regulagem da velocidade de alimentação, a indutância e tensão.



Figura 4.14 – Fonte *Power Wave 450/STT* com alimentador de arame *Power Fedd 10M* da *Lincoln Electric*, usada para o processo STT e curto-circuito convencional

4.3.2 – Fonte e sistema de alimentação para o processo RMD

Para realização das soldas com o processo RMD, utilizou-se uma fonte de energia *PipePro* 450 RFC, com um alimentador de arame *PipePro* Dual DX com dois cabeçotes. É uma fonte multiprocesso, que possui saída nominal de soldagem de 450 A e 44 V com fator de trabalho de 100%, com uma faixa de corrente de 10 a 160 A e tensão entre 10 e 44 V, com tensão em vazio de 80 V (Miller, 2010).

A fonte, mostrada na Fig. 4.15, permite criar e salvar oito programas, quatro para cada cabeçote alimentador, com processos e variáveis distintas. De acordo com as características deste trabalho foi criado um programa selecionando o processo “RMD Pro”, tipo de arame-eletrodo “*Steel*” da série “E70” (aço carbono da série E70), com diâmetro “0.045 in” (1,2 mm) e o gás de proteção “C25” (75% Ar + 25% CO₂).



Figura 4.15 – Fonte *PipePro* 450 RFC com alimentador de arame *PipePro* Dual DX usada para soldagem com o processo RMD

4.3.3 – Fonte e sistema de alimentação para o processo CMT

Utilizou-se para a soldagem neste processo uma fonte de soldagem inversora, TPS 5000 CMT, com comando microprocessado e regulado digitalmente (Fronius, 2006), com

alimentador de arame VR 7000 CMT. Esta é uma fonte multiprocesso, para o processo CMT, é regulado o comprimento do arco, sendo que a regulagem da velocidade de alimentação do arame é realizada na tocha (Fig. 4.16).



Figura 4.16 – Fonte TPS 5000 CMT, utilizada na soldagem com o processo CMT

4.3.4 – Sistema de translação da tocha (Robô)

Para movimentação da tocha, durante a 1ª e 2ª etapa deste trabalho, foi utilizado um braço mecânico da FANUC Robotic modelo Arc Mate 100 iBe, com 6 graus de liberdade e capacidade máxima na flange de 6 kg, mostrado na Fig. 4.17.



Figura 4.17 – Braço mecânico Arc Mate 100 iBe com 6 graus de liberdade da FANUC

4.3.5 – Sistema de translação da tocha (Tartílope V4)

Para as 3ª e 4ª etapa deste trabalho, foi utilizado um sistema orbital com 4 graus de liberdade, fabricado pela IMC, parceria entre a UFU e a UFSC. Este equipamento permite a soldagem em chapa plana e também a soldagem circunferencial, em tubos, como mostrado na Fig. 2.29a.

4.3.6 – Tochas

Para o processo STT, RMD e curto-circuito convencional, foi utilizada uma tocha automática do fabricante TBi, modelo 511 Aut. Esta é uma tocha refrigerada à água com corrente máxima de 450 A para mistura de gases e 500 A quando utilizada com CO₂ puro (TBi Industries, 2010). Na Fig. 4.17, se mostra a tocha montada na flange do robô.

A tocha utilizada no processo CMT, é uma tocha semiautomática PullMig CMT refrigerada a água, da empresa Fronius. Um motor de passo está instalado na tocha, responsável por fazer o recuo do arame até 70 vezes por segundo (Markus, 2010), e outro motor se encarrega da alimentação constante do arame. Entre estes motores está posicionado um “pulmão” ou *buffer*, que absorve o movimento do arame perante um conduíte flexível posicionado dentro dele, mostrados na Fig. 2.8(b). A tocha CMT é mostrada na Fig. 4.18.



Figura 4.18 – Tocha PullMig CMT da Fronius

4.3.7 – Suporte para soldagem automatizada em diferentes posições

Este suporte foi construído para fixação e posicionamento das placas de teste, como detalhado no capítulo III e mostrado na Fig. 4.17, com chapas fixadas na posição vertical.

4.3.8 – Simulador de Soldagem de Dutos por Retificação (SSDR)

Este dispositivo foi construído com o intuito de fazer simulações de soldagem circunferencial em chapas planas. A concepção e construção foram discutidas no Capítulo III.

4.3.9 – Sistema de aquisição de dados para monitoramento da tensão e corrente

A Fig. 4.19, mostra o esquema do sistema geral de aquisição, montado para coletar os sinais de corrente, tensão de soldagem e velocidade de alimentação.

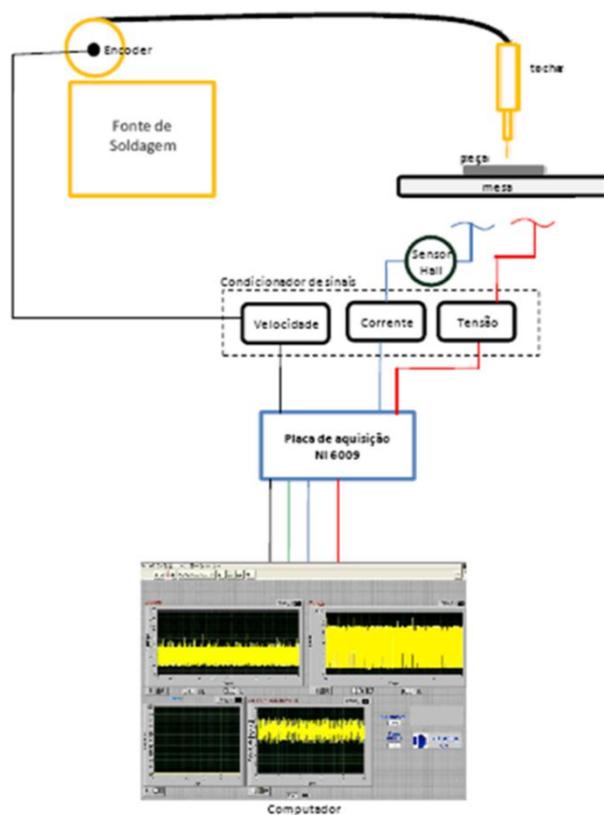


Figura 4.19 – Esquema da montagem do sistema de aquisição (modificado de Souza, 2010)

Este sistema utiliza uma placa de aquisição modelo NI USB-6009, Fig. 4.20, com um software em ambiente LabView, usado para o tratamento dos sinais adquiridos durante as soldagens.



Figura 4.20 – Placa NI USB-6009 (NATIONAL INSTRUMENTS, 2010)

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são mostrados os resultados obtidos, na sequência desde a 1ª até a 4ª etapa como representados na Fig. 1.1, para cada um dos processos de soldagem. Seguindo-se a metodologia e procedimento experimental (Capítulo III e IV), bons cordões de solda de passe de raiz foram conseguidos verificados por análise visual da face e da raiz de cada cordão. Assim, o seguinte passo para validar a metodologia e procedimentos usados neste trabalho foi realizar uma análise final, de macrografia, em cada etapa e para cada um dos processos de soldagem utilizados.

5.1 – RESULTADOS PARA O PROCESSO STT

5.1.1 – Resultados da 1ª etapa com STT - Parametrização

Na fonte com o processo STT selecionado, os parâmetros e os valores limites dentro dos quais podem ser regulados são mostrados na Tab. 5.1. A definição e efeitos destes parâmetros no cordão de solda e no oscilograma de corrente são apresentados nas Fig. 2.3 e 2.5.

Tabela 5.1 – Faixa de regulagem permitida, pela fonte STT, dos parâmetros Corrente de pico (I_p), Corrente de base (I_b) e Tail-Out (TO)

Variável	Mínimo	Máximo
I_p [A]	0	550
I_b [A]	0	220
TO	0	10

Assim, considerando os valores limites dos parâmetros apresentados na Tab. 5.1, o envelope operacional foi determinado. A Tab. 5.2 mostra os valores mínimo e máximo deste envelope operacional mostrando ainda um valor médio adicionado, em cada parâmetro, com a intenção de montar um planejamento experimental que permita realizar testes de uma forma mais ordenada e rápida.

Tabela 5.2 – Variáveis e níveis do envelope de trabalho a serem considerados para o planejamento experimental para o processo STT

Variável	Min (-1)	Médio (0)	Máx (+1)
Ip [A]	360	400	440
Ib [A]	80	95	110
TO	0	5	10

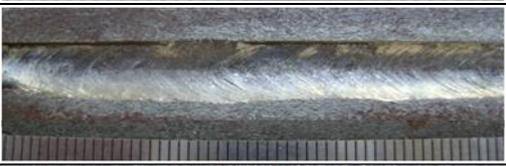
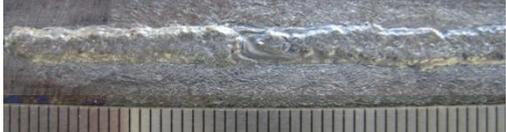
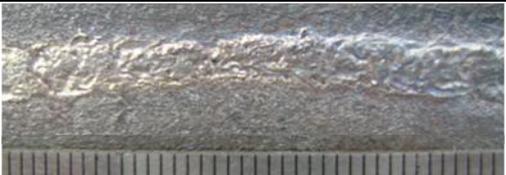
Com os valores desta tabela e usando o programa Statistica® foi montado o planejamento fatorial fracionário da forma 3^{3-1} , considerando uma sequência de corridas aleatórias para evitar erros sistemáticos. A Tab. 5.3 mostra a matriz de planejamento para este processo.

Tabela 5.3 – Matriz de planejamento experimental fracionário (3^{3-1}), em disposição aleatória, para o processo STT

Corridas	Ip [A]	Ib [A]	TO
7	440	80	5
9	440	110	10
3	360	110	5
1	360	80	0
6	440	110	0
8	440	95	0
2	360	95	10
5	400	95	5
4	400	80	10

Com as chapas fixadas e posicionadas, como mostrado na Fig. 3.6, e considerando os parâmetros já estabelecidos, procedeu-se à execução das corridas da Tab. 5.3, realizando-se uma réplica de cada corrida. Posteriormente foi realizada uma análise visual dos três cordões de cada corrida, como explicado na metodologia. Perante este análise se determinou que a corrida n° 2 apresentou o melhor aspecto visual tanto na face como na raiz do cordão, sendo assim considerada como a corrida apropriada, com os parâmetros respectivos, para ser usada nas etapas posteriores. A Tab. 5.4, mostra os cordões obtido com esta corrida, com sua respectiva codificação e a Im e Um.

Tabela 5.4 – Aspectos da face e da raiz dos cordões de solda obtidos com a corrida n° 2, em chapas de 6,3 mm de espessura e com cobre-junta, para o STT

Posição	Im [A]	Um [V]	Formato do cordão
SP2 (Face)	166,7	16,6	
SP2 (Raiz)			
SVD2 (Face)	175,3	16,3	
SVD2 (Raiz)			
SSC2 (Face)	169,6	17	
SSC2 (Raiz)			

A Fig. 5.1 apresenta a seção transversal dos cordões de solda obtidos nesta etapa.

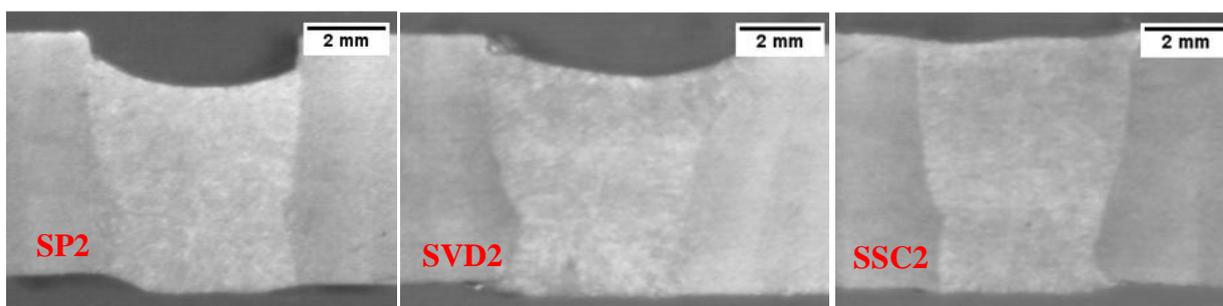


Figura 5.1 – Seção transversal dos cordões de passe de raiz obtidos com os parâmetros da corrida n° 2 do planejamento experimental para o processo STT

Pode-se ver da Fig. 5.1, que com os parâmetros da corrida 2 se conseguiu penetração total nas três posições de soldagem testadas. A SP2, apresentada uma leve concavidade na face do cordão, isto devido a que a força de gravidade é maior nessa posição acrescida pela força do arco empurrando o metal líquido da poça contra a cobre-junta. Esta leve concavidade é favorável para a deposição do seguinte passe, toda vez que uma superfície convexa pode originar falta de fusão e/ou inclusões entre a parte lateral do cordão convexo e a parede do chanfro quando a deposição do seguinte passe seja realizada. Já nas posições SVD2 e SSC2, a concavidade diminui devido a que a tocha muda da posição plana até a posição sobrecabeça diminuindo também a ação da força de gravidade no destacamento da gota.

Os reforços da raiz dos cordões também se apresentam uniformes, ao mesmo nível que a superfície inferior das chapas devido ao uso da cobre-junta, a pesar do leve desalinhamento dos metais de base, desalinhamento este que pode acontecer na montagem de tubos, mostrando com isto certa robustez do processo.

Com os resultados obtidos, pode-se dizer que a soldagem em tubo pode ser realizada para tubos das mesmas características da placa de teste e com as mesmas condições de soldagem.

Na Fig. 5.2 mostram-se os oscilogramas de tensão e corrente para a Corrida 2 do planejamento STT. Pode-se ver nestes gráficos, que a frequência dos ciclos é maior na posição plana, diminuindo na vertical e mais ainda na sobrecabeça para um mesmo intervalo de tempo. Isto é devido à força da gravidade, que na posição plana age de modo favorável ao destacamento da gota, diminuindo em intensidade assim que vai mudando para a posição sobrecabeça, onde age em forma contrária ao destacamento da gota, diminuindo com isso o tempo da transferência da gota.

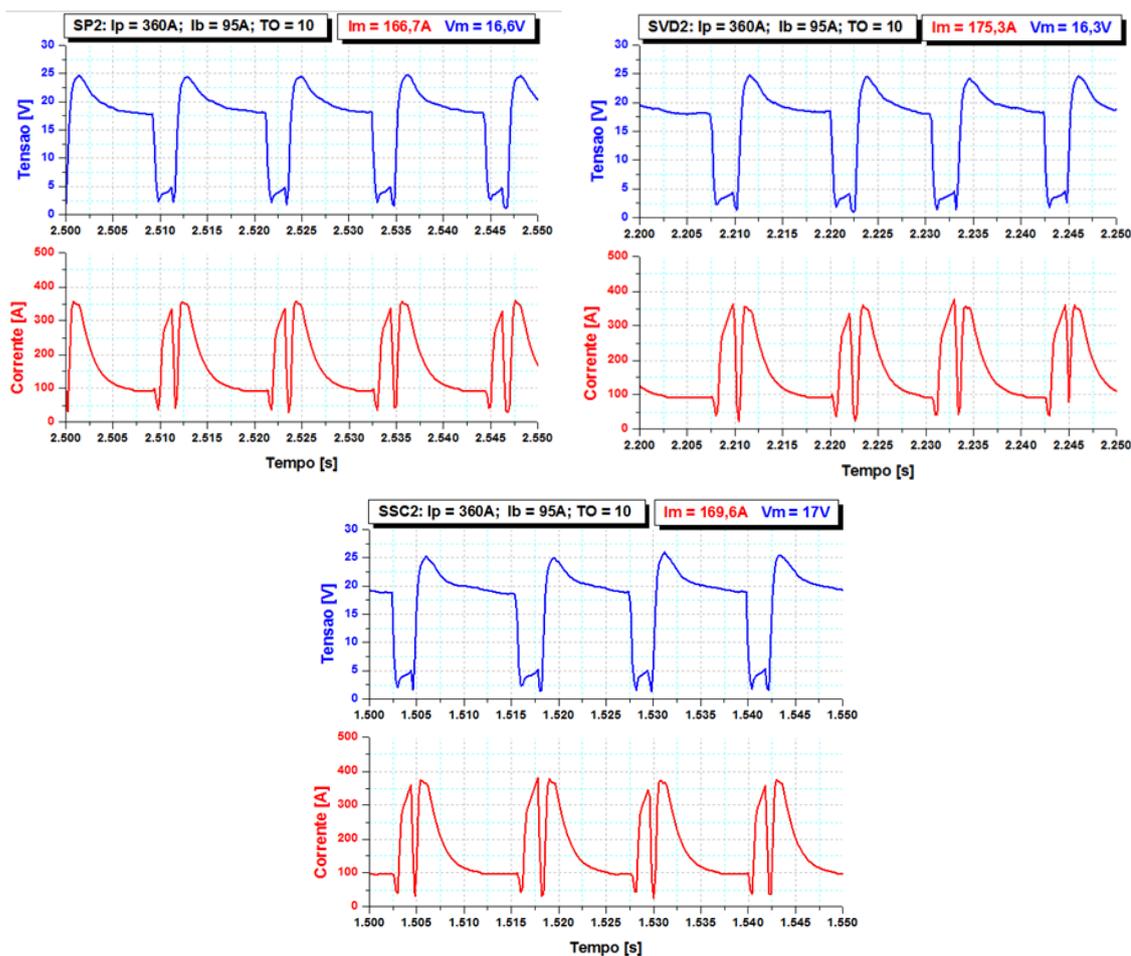


Figura 5.2 – Oscilogramas de tensão e corrente da Corrida 2 do planejamento STT, nas posições plana, vertical e sobrecabeça.

5.1.2 – Resultados da 2ª etapa com STT – Chanfro inclinado

Com as chapas de testes já prontas, fixadas e posicionadas como na Fig. 3.6, e considerando os parâmetros da corrida n° 2, da Tab. 5.3, a deposição do cordão foi realizada. Posteriormente se analisou a parte inferior, oposta ao lado de deposição do cordão, para encontrar o ponto de penetração total obtido após a soldagem. Pode-se verificar que se obtiveram diferentes pontos de início de penetração total para cada posição, ressaltados por círculo vermelho tracejado na Fig. 5.3, isto devido à força de gravidade agir em forma diferente em cada posição, confirmando-se que na posição vertical descendente a penetração total apresenta a menor espessura atingida devido ao escorregamento do metal líquido da poça de fusão interferindo entre o arco e o metal de base. Assim, esta menor espessura de nariz será

o tamanho a usar na construção da nova configuração de junta. Também esta espessura pode ser obtida em qualquer das outras duas posições o que não pode ser obtido da forma inversa.

Assim, nas chapas de teste de SVD, a distância entre as linhas onde a penetração foi obtida é de 35,5 mm, a distância desde o ponto onde a penetração começa até a linha do intervalo onde o tamanho de nariz é de 2 mm é de 13 mm. Com estes valores pode-se determinar, por relação de triângulos, que o valor do tamanho do nariz obtido no ponto de penetração total, nesta posição de soldagem, é de 1,63 mm. Prolongando-se a linha vermelha desde o ponto de penetração encontrado na SVD sobre a linha de penetração encontrada na SP e SSC, pode-se ter uma idéia do comportamento da raiz nas outras posições de soldagem, quando da validação desta metodologia.

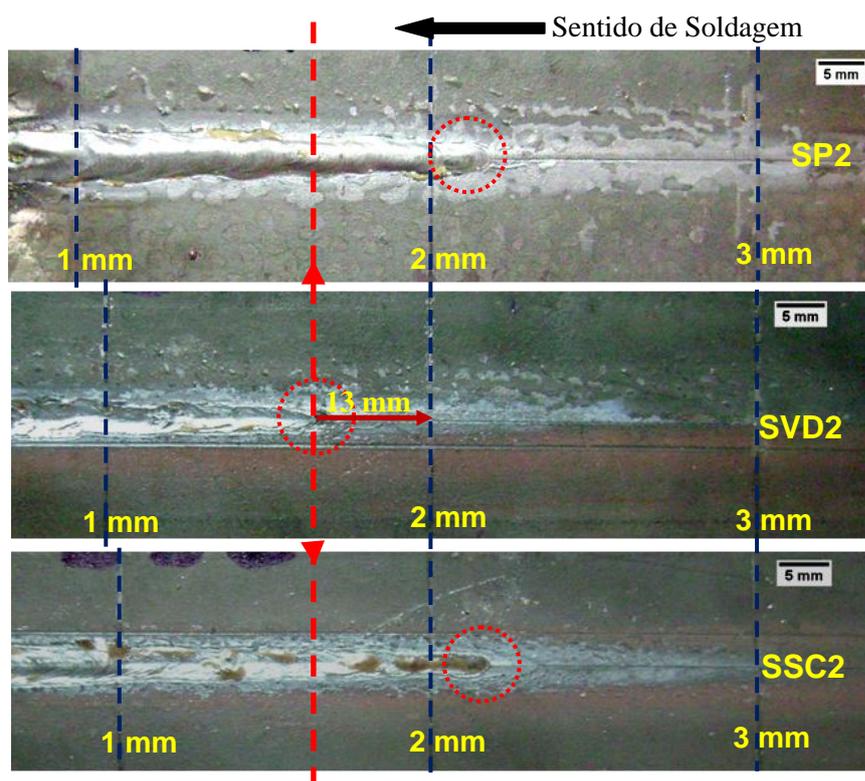


Figura 5.3 - Parte inferior da junta com nariz inclinado após o processo de soldagem com STT, ressaltando-se com círculos os pontos onde a penetração total se inicia em cada posição

Logo, considerando-se o valor de 1,6 mm encontrado, foram preparadas as novas placas de teste com o formato de junta mostrado na Fig. 4.4, considerando um valor de “h” de 1,6 mm.

A Fig. 5.4 mostra a face e raiz dos cordões de solda obtidos na nova junta, com o intuito de validar o tamanho de nariz.

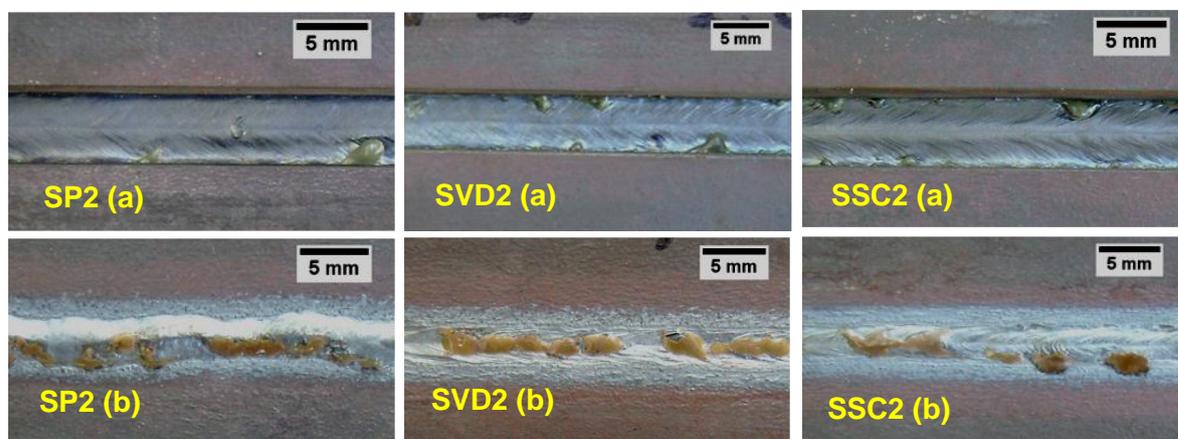


Figura 5.4 – Aspectos da face (a) e raiz (b) dos cordões de solda obtidos com nariz de 1,6 mm, em chapas de 10 mm de espessura e sem cobre-junta, com o STT

Um ensaio de macrografia foi realizado verificando a falta de defeitos internos no metal de solda.

A seção transversal dos cordões de passe de raiz depositados em junta com nariz de 1,6 mm, encontrado com a “Metodologia do chanfro com nariz inclinado”, para validar a metodologia, são mostradas na Fig. 5.5.

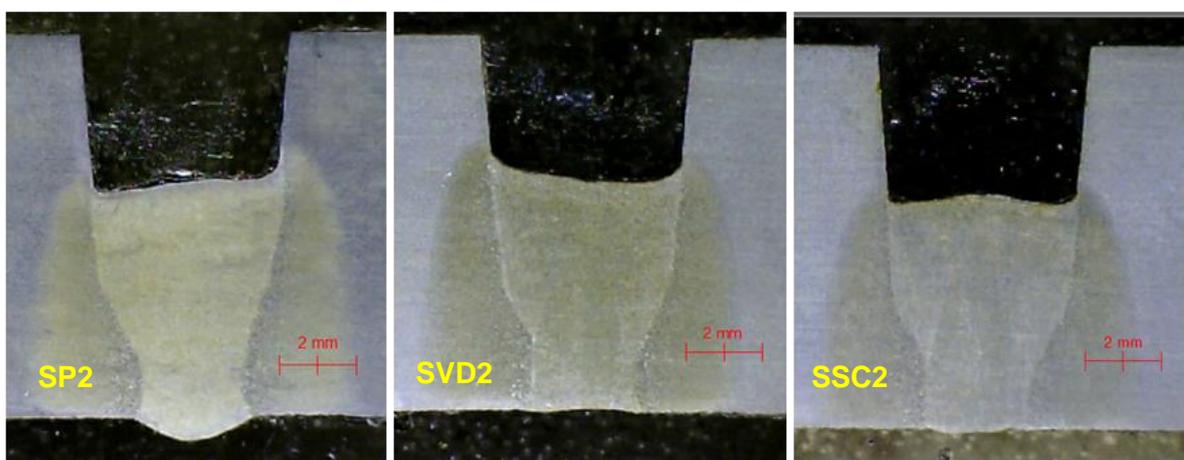


Figura 5.5 – Seção transversal dos cordões de passe de raiz, das três posições testadas, realizados para validar o tamanho de nariz de 1,6 mm, encontrado para o processo STT

Na posição SP2, obteve-se um pequeno reforço na base da raiz, isso devido às forças que agem na transferência metálica do processo estão em ação direta sobre a poça de fusão ajudando na evolução da penetração e como consequência do reforço. Neste caso, não existindo cobre-junta para limitar a formação do reforço, este tamanho de reforço será o tamanho máximo a ser atingido durante a soldagem circunferencial, isto por que, após os 0°, posição plana, a posição da tocha começa a mudar inclinando-se até chegar aos 90°, posição vertical, e com isto o reforço irá diminuindo.

Nas posições SVD2 e SSC2 o formato da raiz é similar ao encontrado quando se utiliza cobre-junta, a qual não deixa vazar o metal líquido da poça de fusão contendo-o e limitando-o ao mesmo nível do metal de base. Nestes gráficos, se mostra que a cobre-junta não é necessária quando esta metodologia é utilizada, evitando-se com isso as penetrações e impurezas que o cobre pode ocasionar na base do metal de solda.

Pode-se ver na Fig. 5.5 que a seção transversal do metal de solda não apresentou falta de fusão, inclusões, nem mordeduras em nenhuma das três posições. O formato da face do cordão de solda se apresenta apropriada para receber o seguinte passe. Neste caso e para estas condições, a metodologia para encontrar o tamanho de nariz, foi validada.

5.1.3 – Resultados da 3ª etapa com STT - Simulação

Na Tab. 4.1, são mostrados os valores dos parâmetros usados para o processo de simulação e que também foram usados para todos os processos de soldagem. Nesta tabela foi considerada na primeira fila uma soldagem de 180° e na segunda fila uma soldagem de 185°. O valor de 185° foi considerado para iniciar o processo de soldagem com 5° antes da posição plana, ou em 0°, com o intuito de vencer efeitos de inércia dos equipamentos, aumentando o comprimento das placas de teste em 10 mm. Verifica-se ainda que a diferença entre estes dois comprimentos de solda (180° - 185°.) é o tempo gasto devido aos 5° a mais, mantendo-se constante os outros parâmetros, o que é verdadeiro.

Assim, com as placas de soldagem prontas e fixadas no “simulador”, com os parâmetros de soldagem fixos, com os parâmetros da corrida 2 e os valores da Tab. 4.1, o processo de simulação foi realizado para juntas que usa cobre-junta e também para juntas que não usam

cobre-junta. A Fig. 5.6 e a Fig. 5.7 mostram a face e raiz, dos cordões realizados, nos pontos onde a posição é plana, vertical descendente e sobrecabeça, segundo a Fig. 4.13, em junta com cobre-junta e sem cobre-junta, respectivamente.

A seguir uma análise de macrografia foi realizada, nos dois conjuntos de chapas de teste, com o intuito de verificar uma seção transversal dos cordões de solda sem defeitos.

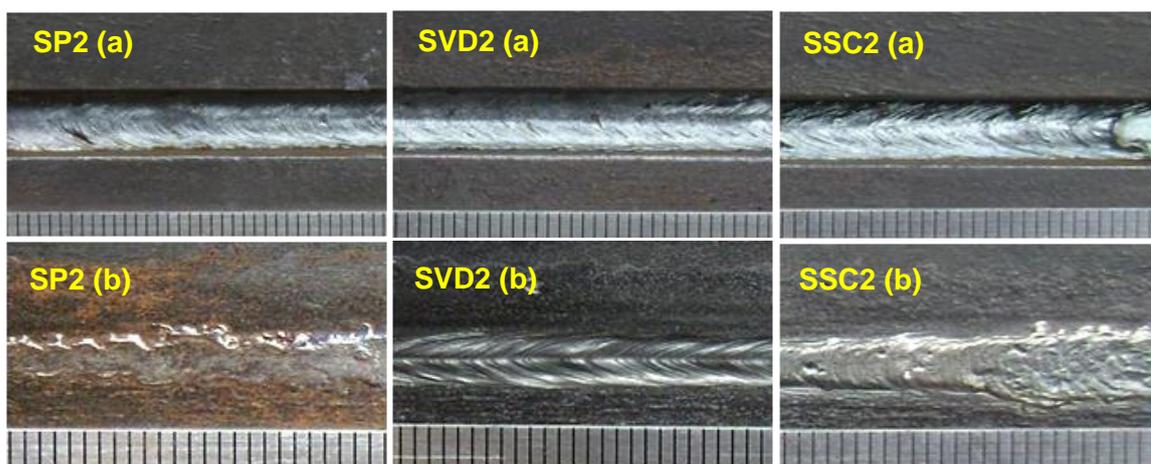


Figura 5.6 – Formato da (a) face e (b) raiz dos cordões de solda obtidos no processo de simulação, em chapas de 10 mm de espessura e em junta com cobre-junta, com STT

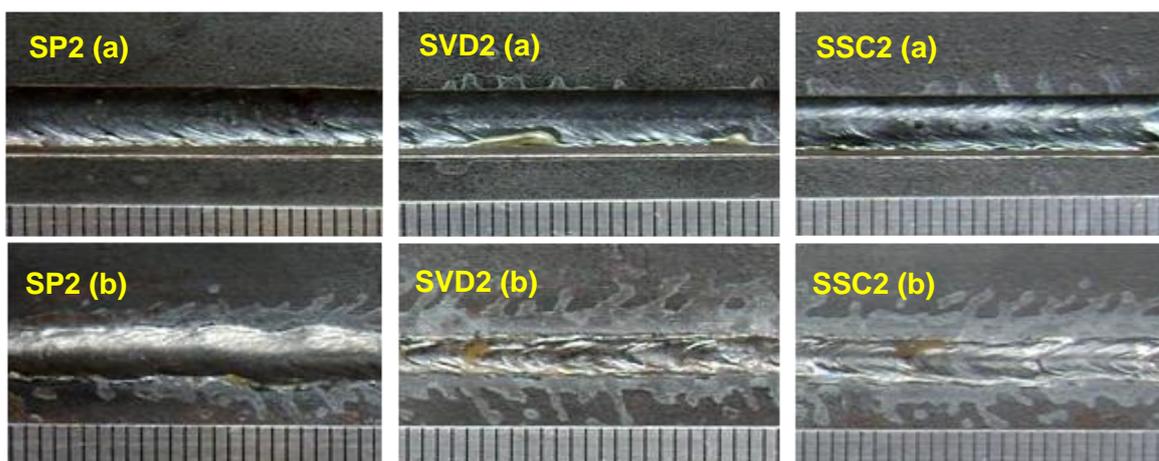


Figura 5.7 – Formato da (a) face e (b) raiz dos cordões de solda obtidos no processo de simulação, em chapa de 10 mm de espessura, com nariz de 1,6 mm, junta sem cobre-junta, com STT

A Fig. 5.8 mostra a seção transversal do cordão de passe de raiz obtido com o processo de simulação em junta que usa cobre-junta e a Fig. 5.9, em junta que não usa cobre-junta, considerando o posicionamento dos corpos de prova segundo a Fig. 4.13.

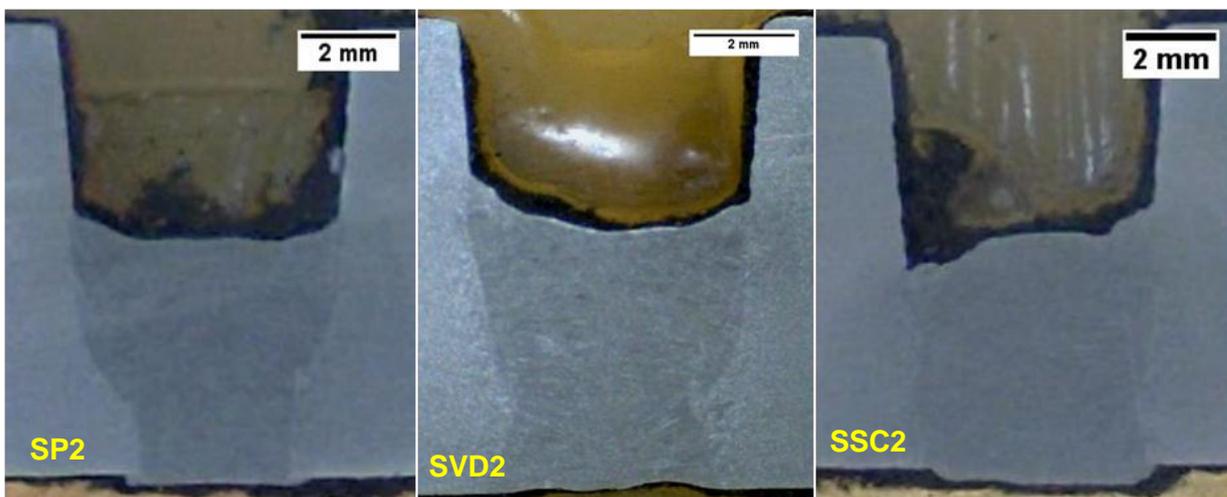


Figura 5.8 – Seção transversal do cordão, realizado com o processo de simulação, nos pontos onde se encontram as posições SP2, SVD2 e SSC2, em junta que usa cobre-junta, com STT

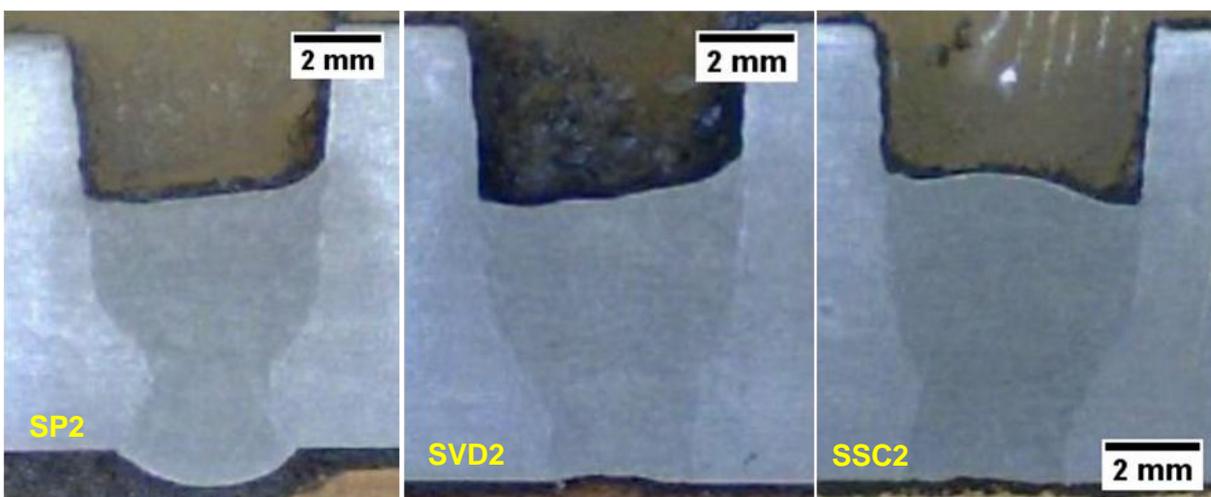


Figura 5.9 - Seção transversal do cordão, realizado com o processo de simulação em pontos onde se encontram as posições SP2, SVD2 e SSC2, em junta que não usa cobre-junta, com STT

Pode-se perceber a maior diferença entre o processo de simulação de soldagem circunferencial em formato de junta que usa cobre-junta (Fig. 5.8) e a que não usa cobre-junta (Fig. 5.9), proposta neste trabalho, é o reforço da raiz na posição plana na junta sem cobre-

junta, os outros formatos são similares em ambos os procedimentos. Pode-se perceber também que, a largura do formato de penetração na raiz do cordão de solda é mais largo quando se usou cobre-junta. Isto é devido a que a energia fornecida pela fonte é maior do que a necessária para fundir o tamanho do nariz da junta, neste caso 0,5 mm, assim o metal fundido é contido pela cobre-junta e o calor restante se espalha pelo corpo da placa de teste. Já nas placas que não usam cobre-junta, o tamanho do nariz encontrado é o tamanho apropriado, 1,6 mm, de tal forma que a energia fornecida é suficiente ou necessária para fundir esse tamanho de nariz e conseguir penetração total sem perder muita energia para o restante das placas de teste.

5.1.4 – Resultados da 4ª etapa com STT – Soldagem circunferencial

Aqui, os tubos foram cortados, usinados, chanfrados e unidos entre eles segundo o procedimento da metodologia. O tamanho de nariz contruido no tubo foi de 1,6 mm, encontrado com a “metodologia do chanfro inclinado” na 2ª etapa, para o processo STT. Posteriormente, os tubos foram montados e fixados no sistema de fixação (Fig. 4.10), junto ao Tartílope, e a soldagem foi realizada considerando-se os parâmetros estabelecidos. Após a soldagem, o tubo foi cortado transversalmente nos pontos correspondentes à posição plana, vertical e sobrecabeça, pontos assinalados na Fig. 4.13. A Fig. 5.10, mostra a face e raiz, dos cordões obtidos nos tubos, nestes pontos.

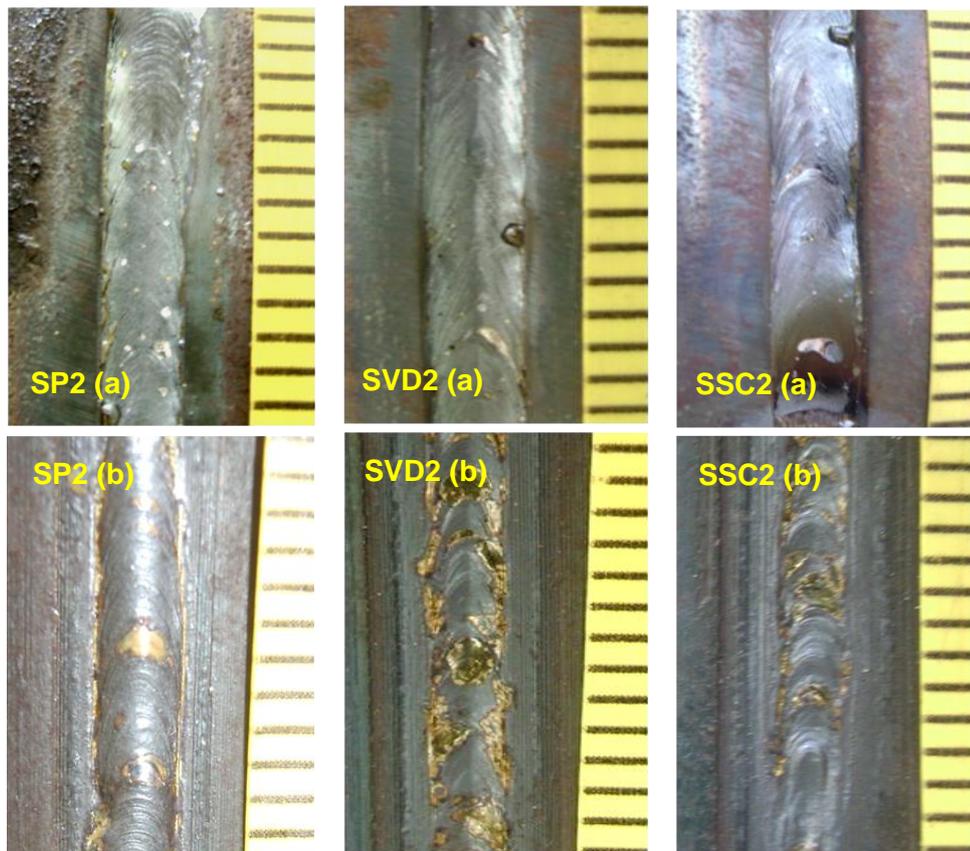


Figura 5.10 – Formato da (a) face e (b) raiz, dos cordões obtidos em tubos, no processo de soldagem circunferencial, com tamanho de nariz de 1,6 mm e sem cobre-junta com STT (a divisão da escala é de 2 mm)

Após isto, uma análise de macrografia foi realizada, nos cordões apresentados na Fig. 5.10, para verificar a seção transversal destes cordões sem defeitos internos. Os resultados das macrografias são mostrados na Fig. 5.11.

Na Fig. 5.11 pode-se ver que a seção transversal do cordão depositado, nestes três pontos, não apresenta defeitos internos. Verifica-se também, que a seção transversal deste cordão de passe de raiz, nestas três posições, apresenta um formato similar aos apresentados na Fig. 5.5 (2^a etapa), e na Fig. 5.9 (3^a etapa).

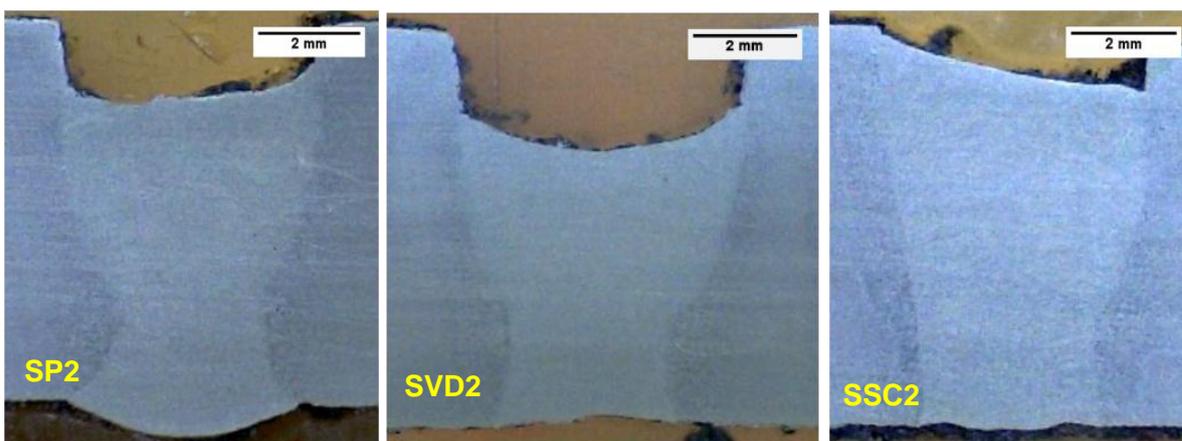


Figura 5.11 – Seção transversal do passe de raiz obtido na soldagem circunferencial, nos pontos onde se encontram as posições SP2, SVD2 e SSC2 com STT

Com estes resultados pode-se dizer que a metodologia proposta, “Metodologia da junta com nariz inclinado”, e o bom funcionamento do “simulador” estão validados para este processo (STT).

5.2 – RESULTADOS PARA O PROCESSO RMD

5.2.1 – Resultados da 1ª etapa com RMD – Parametrização

A fonte PIPE PRO™ 450 RFC da Miller Electric, com o processo RMD selecionado, permite a regulagem da velocidade de alimentação, TRIM e o Arc Control. O TRIM refere-se ao comprimento do arco e o Arc Control refere-se à largura da base do arco elétrico em contato com a peça. Sendo que a velocidade de alimentação é considerada constante (4,5 m/min), a Tab. 5.5, mostra a faixa de regulagem permitida pela fonte para as variáveis a serem usadas neste processo. A definição e efeitos destes parâmetros no oscilograma de corrente foram apresentados na Fig. 2.7.

Tabela 5.5 – Faixa de regulagem permitida pela fonte PIPE PRO™ 450 RFC das variáveis do processo RMD

	Mín.	Máx.
TRIM	0	100
Arc Control	0	50

Assim, considerando esta faixa de regulação dos parâmetros, foi determinado o envelope operacional, resultando nos valores mostrados na Tab. 5.6, a qual mostra os valores mínimo, máximo e um valor médio adicionado, em cada parâmetro, com intenção de montar um planejamento experimental. Tendo-se então, 2 variáveis em 3 níveis, o planejamento será do tipo $3^2 = 9$ corridas e foi montado utilizando o programa STATISTIC[®], considerando-se uma distribuição aleatória para evitar erros sistemáticos, como mostrado na Tab. 5.7.

Tabela 5.6 – Variáveis e níveis do envelope de trabalho a serem considerados para o planejamento experimental para o processo RMD.

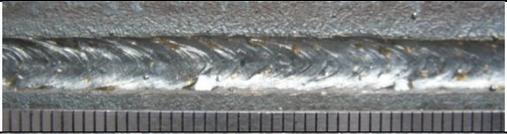
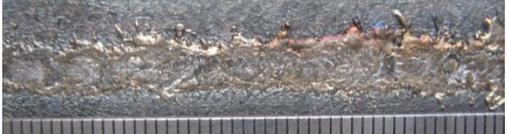
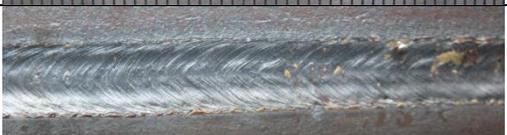
	-1	0	+1
TRIM	50	75	100
Arc Control	25	37	50

Tabela 5.7 – Matriz de planejamento experimental (3^2) para o processo RMD

Corrida	Trim	Arc Control
6	75	50
3	50	50
7	100	25
1	50	25
9	100	50
5	75	37
4	75	25
8	100	37
2	50	37

Com as chapas fixadas e posicionadas, como mostrado na Fig. 3.6, e considerando os parâmetros já estabelecidos procedeu-se à execução das corridas da Tab. 5.7, realizando-se uma réplica de cada corrida. A seguir, foi realizada uma análise visual dos cordões de cada corrida e, perante esta análise, se determinou que a corrida n° 4 apresentou os cordões com melhor aspecto visual tanto na face como na raiz, sendo então, considerada como a corrida apropriada para ser usada nas etapas posteriores. Na Tab. 5.8, são mostrados os formatos da face e raiz, dos cordões obtidos nesta corrida.

Tabela 5.8 – Aspectos da face e da raiz dos cordões de solda obtidos com a corrida n° 4, em chapas de 6,3 mm de espessura e com cobre-junta, para o RMD

Posição	Im [A]	Um [V]	Formato do cordão
RP4 (Face)	196,2	16,5	
RP4 (Raiz)			
RVD4 (Face)	211,5	15,5	
RVD4 (Raiz)			
RSC4 (Face)	189,9	16,6	
RSC4 (Raiz)			

Um ensaio de macrografia foi realizado nos três cordões da corrida 4, com o intuito de verificar uma seção transversal sem defeitos internos. A Fig. 5.12, apresenta a seção transversal dos cordões de solda obtidos nesta etapa.

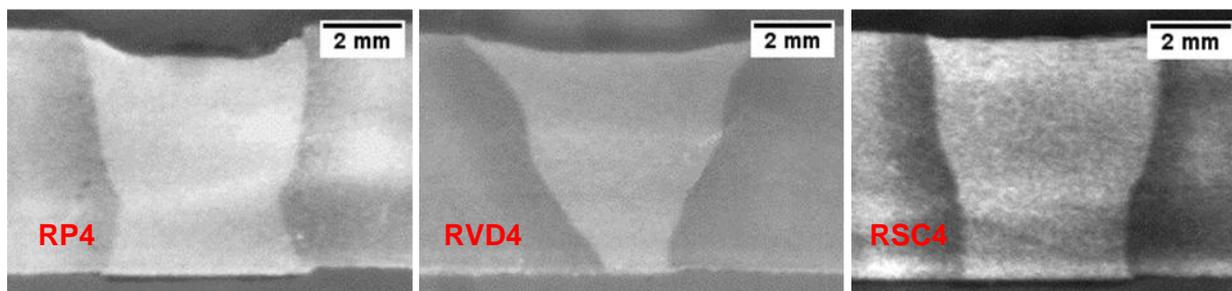


Figura 5.12 – Seção transversal dos cordões de passe de raiz obtidos com os parâmetros da corrida n° 4 do planejamento experimental para o processo RMD

Pode-se ver da Fig. 5.12, que com os parâmetros da corrida 4 se conseguiu cordões com penetração total nas três posições de soldagem testadas. Nos formatos das faces dos cordões pode-se ver que a face é levemente côncava na RP4, diminuindo quando muda para a RVD4 e RSC4, devido à pressão do arco e da força de gravidade ser diferente para cada posição.

Os reforços da raiz dos cordões se apresentam uniformes, ao mesmo nível que a superfície inferior das chapas devido ao uso da cobre-junta, que não permite o vazamento, limitando o reforço da raiz. Pode-se ver em RVD4, que a largura da penetração é menor devido à interferência do metal líquido que escorrega interferindo na ação direta do arco no metal de base absorvendo parte deste calor mas, permitindo apenas a penetração total sem gastar energia no resto da peça. Os oscilogramas de tensão e corrente da corrida 4, da Tab. 5.7, são mostradas na Fig. 5.13.

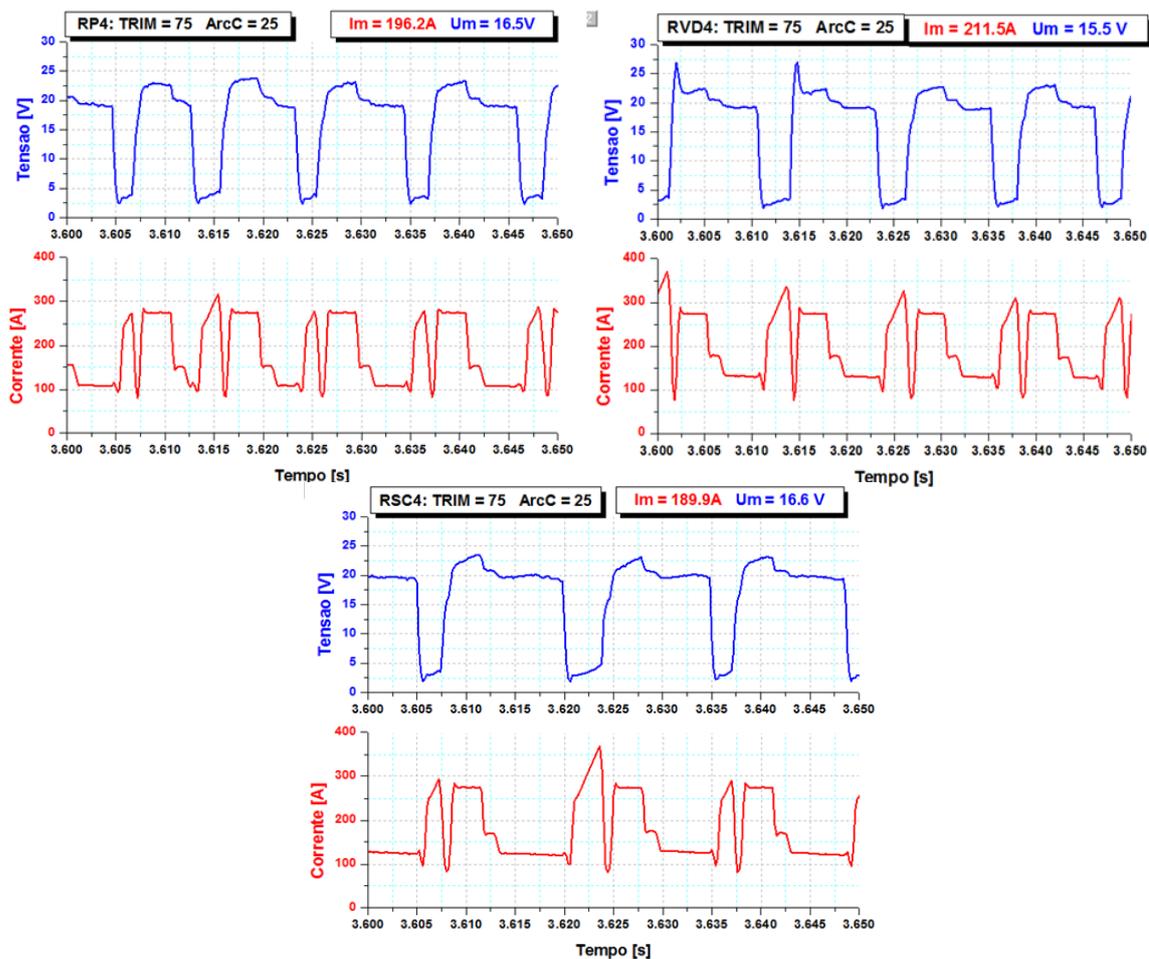


Figura 5.13 – Oscilogramas de tensão e corrente da corrida n° 4 do planejamento RMD, nas posições plana, vertical e sobrecabeça.

5.2.2 – Resultados da 2ª etapa com RMD – Chanfro inclinado

Com as chapas de testes já prontas, fixadas e posicionadas como na Fig. 3.3, considerando os parâmetros da corrida n° 4, da Tab. 5.7, e os parâmetros de soldagem já determinados, a deposição do cordão foi realizada.

Posteriormente se analisou a parte inferior, oposta ao lado de deposição do cordão, para encontrar o ponto de penetração total obtido após a soldagem. Pode-se verificar novamente que se obtiveram diferentes pontos de início de penetração total para cada posição, ressaltados por círculo vermelho tracejado na Fig. 5.14. Pode-se verificar novamente, nesta figura, que na posição vertical, sentido descendente, a penetração total demorou a acontecer. Com isto, este ponto terá a menor espessura de nariz que será a espessura a usar na construção da nova configuração de junta. Também, esta espessura pode ser obtida em qualquer das outras duas posições o que não pode ser obtido na forma inversa.

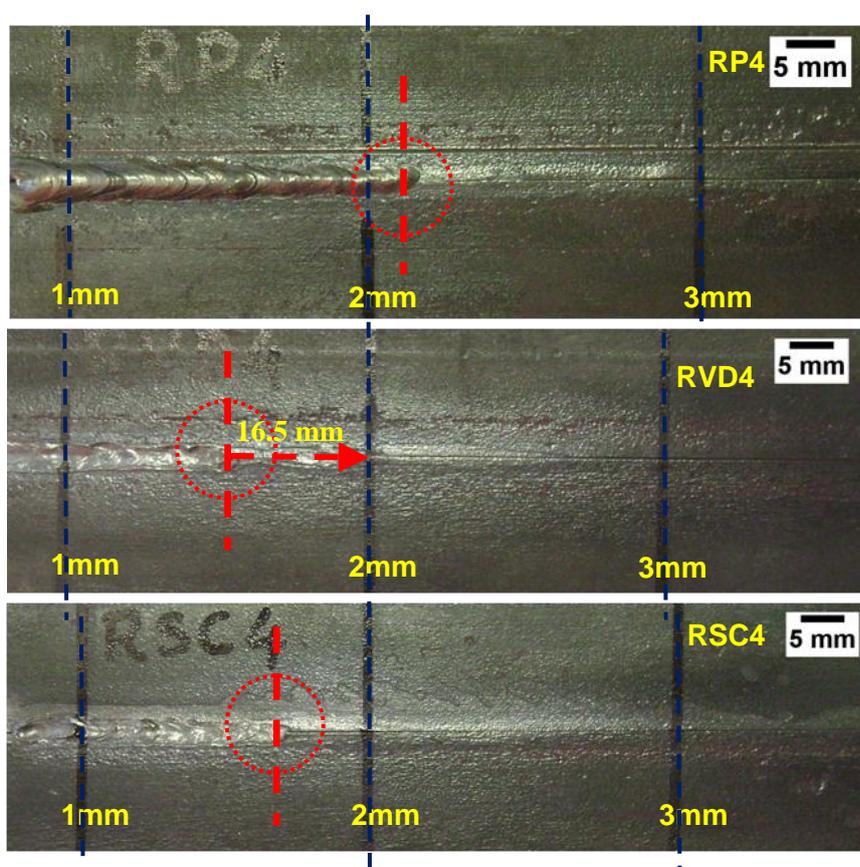


Figura 5.14 - Parte inferior da junta com nariz inclinado após o processo de soldagem com RMD ressaltando-se com círculos os pontos onde a penetração total se inicia em cada posição

Assim, pode-se ver na Fig. 5.14, na placa de teste RVD4, que a distância entre as linhas que representam o tamanho de nariz de 1 e 2 mm é de 35,4 mm e a distância entre o ponto de início de penetração total e a linha do tamanho de nariz de 2 mm é de 16,5 mm. Com estes valores pode-se determinar, por relação de triângulo, que o tamanho de nariz obtido no ponto de penetração total, nesta posição de soldagem, é de 1,64 mm. Prolongando-se uma linha desde este ponto até as RP4 e RSC4, pode-se ter uma idéia do comportamento da raiz nas outras posições de soldagem, quando da validação da metodologia.

Logo, considerando o tamanho de nariz de 1,65 mm, foram preparadas as novas placas de teste com o formato de junta mostrado na Fig. 4.4. Com isto, a soldagem foi realizada nas 3 posições estudadas. A Fig. 5.15, mostra a face e raiz dos cordões de solda depositados na nova junta nas posições plana, vertical sentido descendente e sobrecabeça respectivamente.

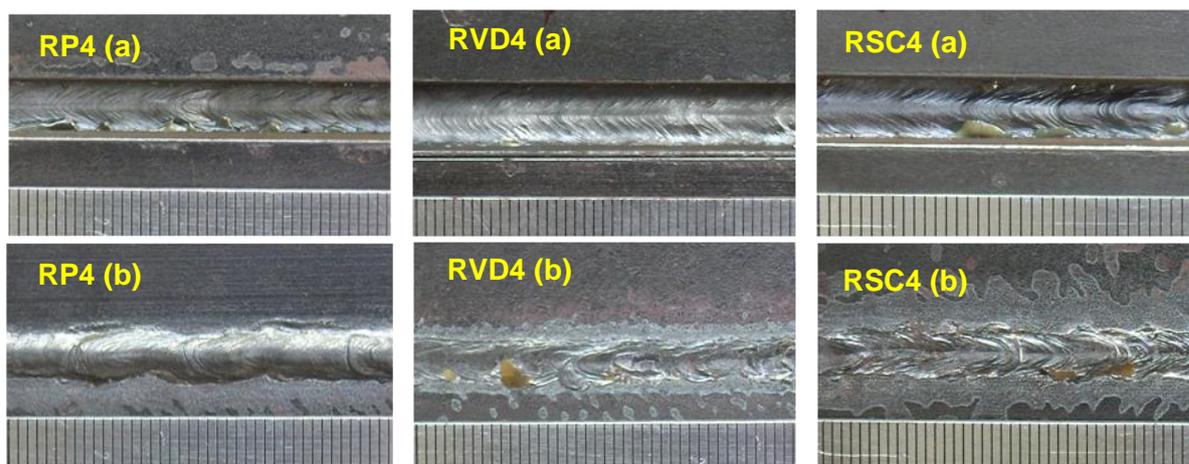


Figura 5.15 – Aspectos (a) da face e (b) da raiz dos cordões de solda obtidos com nariz de 1,65 mm, em chapas de 10 mm de espessura, em junta sem cobre-junta com o RMD

As seções transversais destes cordões de passe de raiz (Fig. 5.15), depositados em junta com nariz de 1,65 mm, encontrado com a “Metodologia do chanfro com nariz inclinado”, para validar a metodologia, são mostradas na Fig. 5.16.

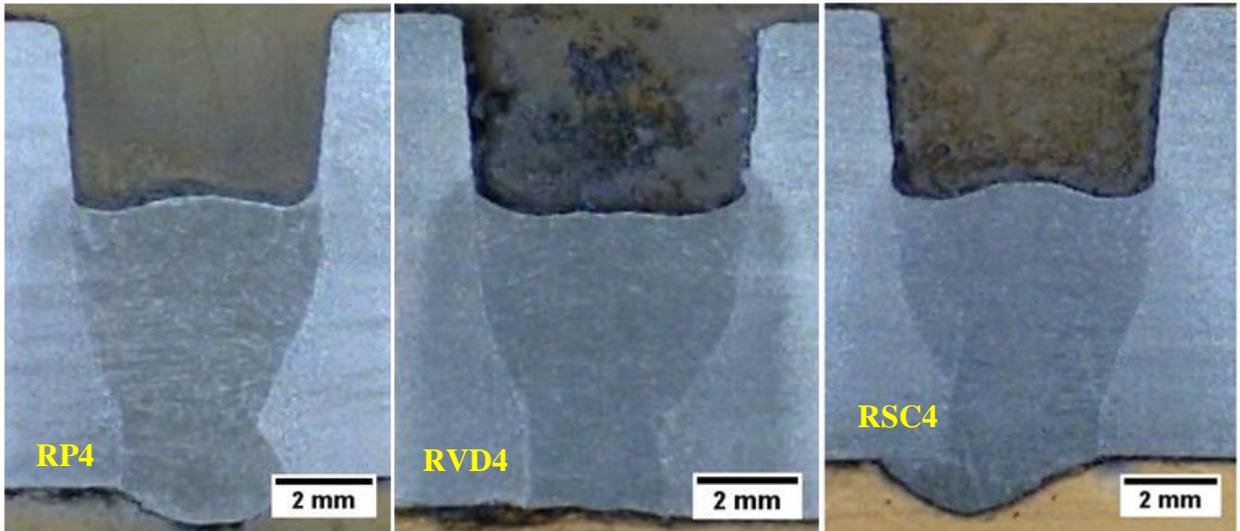


Figura 5.16 – Seção transversal dos cordões de passe de raiz, realizados para validar a espessura de nariz de 1,65 mm, encontrada para o processo RMD

Na posição RP4, obteve-se um pequeno reforço na base da raiz, isso devido às forças que agem na transferência metálica do processo exercem maior pressão sobre a poça de fusão ajudando na evolução da penetração, o que não acontece nas outras posições. Este reforço será o reforço máximo, nesta soldagem, e irá diminuindo com a progressão da soldagem para as outras posições, RVC4 e RSC4.

Na posição RVD4, o formato do reforço da raiz é similar ao encontrado quando se utiliza cobre-junta, a qual não deixa vazar o metal líquido da poça de fusão contendo-o e limitando-o ao mesmo nível do metal de base.

A figura na posição RSC4 mostra um pequeno reforço desviado para um dos lados da raiz. Este reforço mostrado se apresenta muito esporadicamente quando se solda na posição sobrecabeça ao longo da soldagem, inclusive em outros processos. Acredita-se que durante a soldagem sobrecabeça o metal líquido não se espalha sobre o metal de base, como na posição plana, e sim tende a cair, pelo efeito da gravidade, isto faz com que o arco aja diretamente no metal de base (nariz), fundindo-a até chegar a borbulhar, originando esses reforços aleatórios e em alguns casos até espalhando-os em forma de salpicos ou respingos fora da raiz do cordão.

No geral, pode-se ver que na Fig. 5.16, as seções transversais do metal de solda não apresentaram falta de fusão, inclusões, nem mordeduras. O formato da face do cordão de solda apresenta-se apropriado para receber o seguinte passe. Neste caso e para estas condições, a metodologia para encontrar o novo formato da junta se apresenta validada.

5.2.3 – Resultados da 3ª etapa com RMD – Simulação

Com os valores da Tab. 4.1 inseridos no sistema, com as placas de soldagem prontas e fixadas no “simulador”, com os parâmetros de soldagem pré-determinados e com os parâmetros da corrida n° 4, o processo de simulação foi realizado. Primeiramente foi realizada a simulação em chapas de teste com o formato de junta que usa cobre-junta e numa segunda simulação o formato de junta que não usa cobre-junta. A Fig. 5.17 e a Fig. 5.18 mostram os formatos, da face e raiz, dos cordões obtidos com o processo de simulação, nos pontos onde a posição é plana, vertical e sobrecabeça, segundo o posicionamento dos corpos de prova mostrado na Fig. 4.13, em junta com cobre-junta e sem cobre-junta, respectivamente.

Posteriormente, uma análise de macrografia foi realizada nos dois conjuntos de chapas de teste com o intuito de verificar a seção transversal dos cordões de solda sem defeitos.

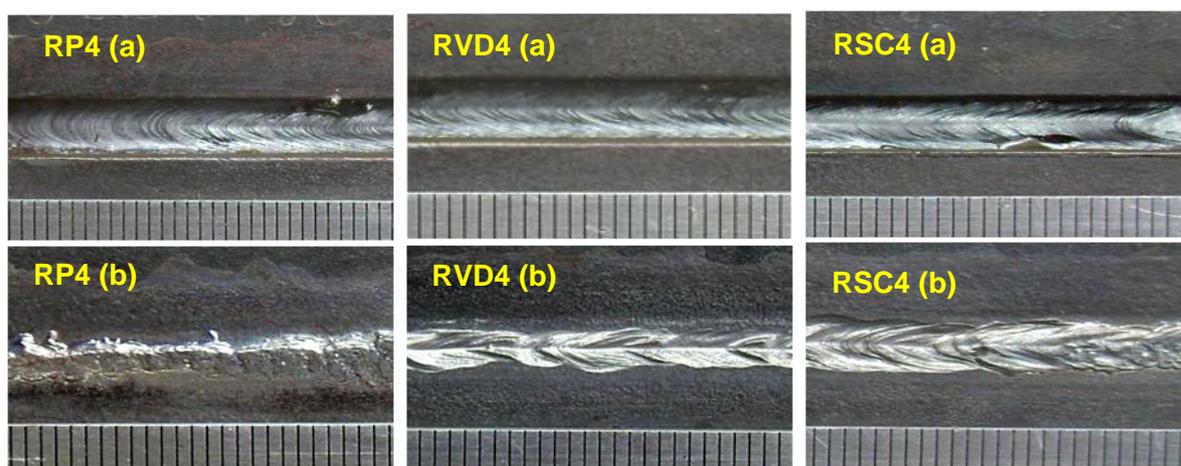


Figura 5.17 – Formato da (a) face e (b) raiz dos cordões de solda obtidos no processo de simulação em chapa de 10 mm de espessura, em junta com cobre-junta, com RMD

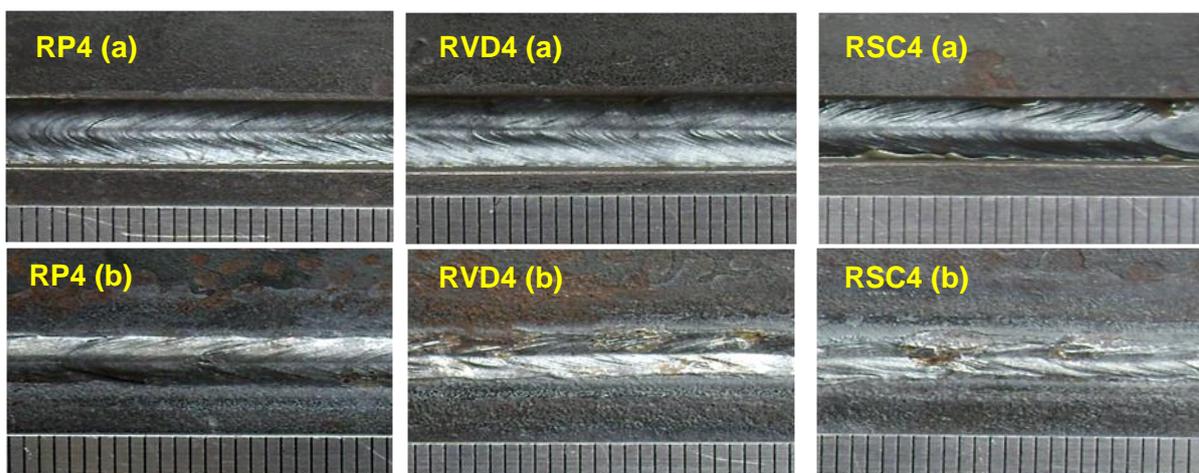


Figura 5.18 – Formato da (a) face e (b) raiz dos cordões de solda obtidos com o processo de simulação, em chapa de 10 mm de espessura, com nariz de 1,65 mm, em junta sem cobre-junta, com RMD

A Fig. 5.19 mostra a seção transversal do cordão obtido para o processo de simulação em junta com cobre-junta e a Fig. 5.20, em juntas sem cobre-juntas, considerando o posicionamento dos corpos de prova segundo a Fig. 4.13.

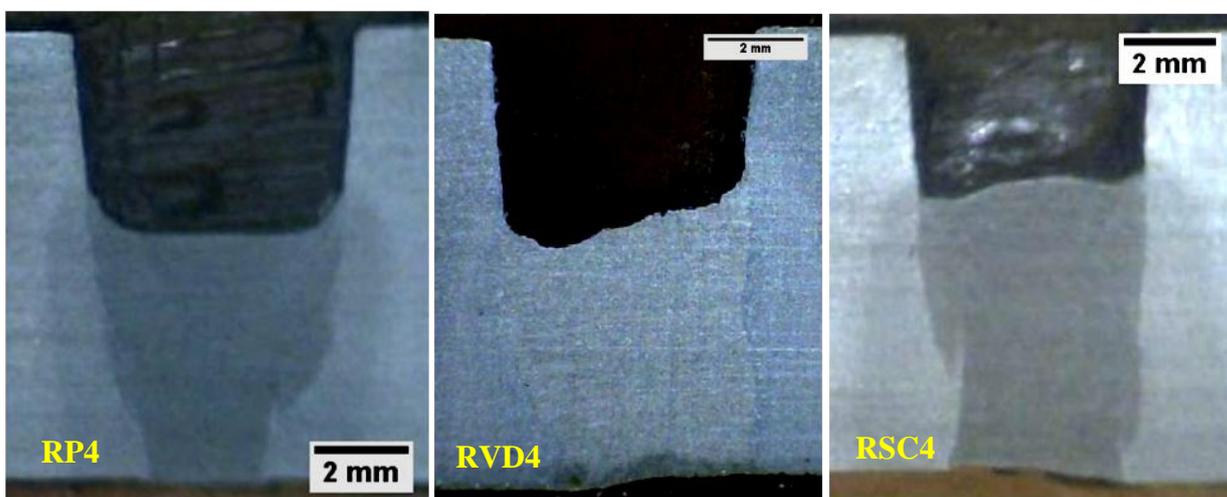


Figura 5.19 – Seção transversal do cordão, realizado com o processo de simulação em pontos onde se encontram as posições SP4, SVD4 e SSC4, em junta que usa cobre-junta, com RMD

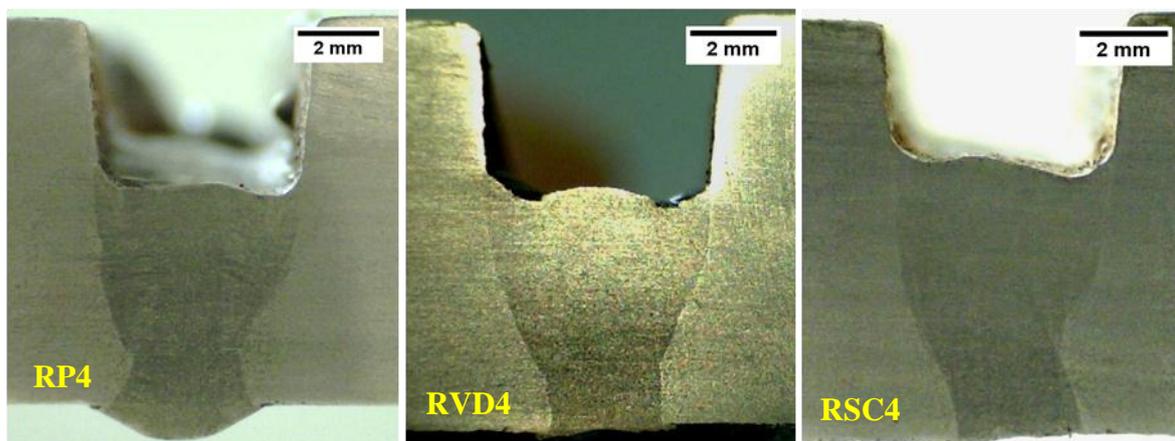


Figura 5.20 - Seção transversal do cordão, realizado com o processo de simulação, em pontos onde se encontram as posições RP4, RVD4 e RSC4, em junta que não usa cobre-junta, com RMD

Pode-se perceber das Fig. 5.19 e 5.20 que as seções transversais nos dois processos de simulação não apresentam defeitos internos, a penetração foi total em ambos os casos, o formato da raiz também são similares para as posições RVD4 e RSC4. A diferença mais notável é o reforço da raiz no cordão depositado no momento da soldagem estar na posição plana, quando não se usa cobre-junta, isto devido à pressão das forças que ajudam no destacamento da gota nesta posição, como explicado anteriormente.

5.2.4 – Resultados da 4ª etapa com RMD – Soldagem circunferencial

Nesta etapa, os tubos foram cortados, usinados, chanfrados e unidos entre eles segundo o procedimento experimental. O tamanho de nariz contruído na junta para o tubo foi de 1,65 mm, encontrado na 2ª etapa, para o RMD. Posteriormente, os tubos foram montados no sistema de fixação junto ao Tartílope, como mostrado na Fig. 4.10, e a soldagem foi realizada considerando todos os parâmetros estabelecidos. A Fig. 5.21 mostra a face e raiz dos cordões depositados nos tubos, nos pontos onde as posições são: plana, vertical e sobrecabeça respectivamente, como representado Fig. 4.13.

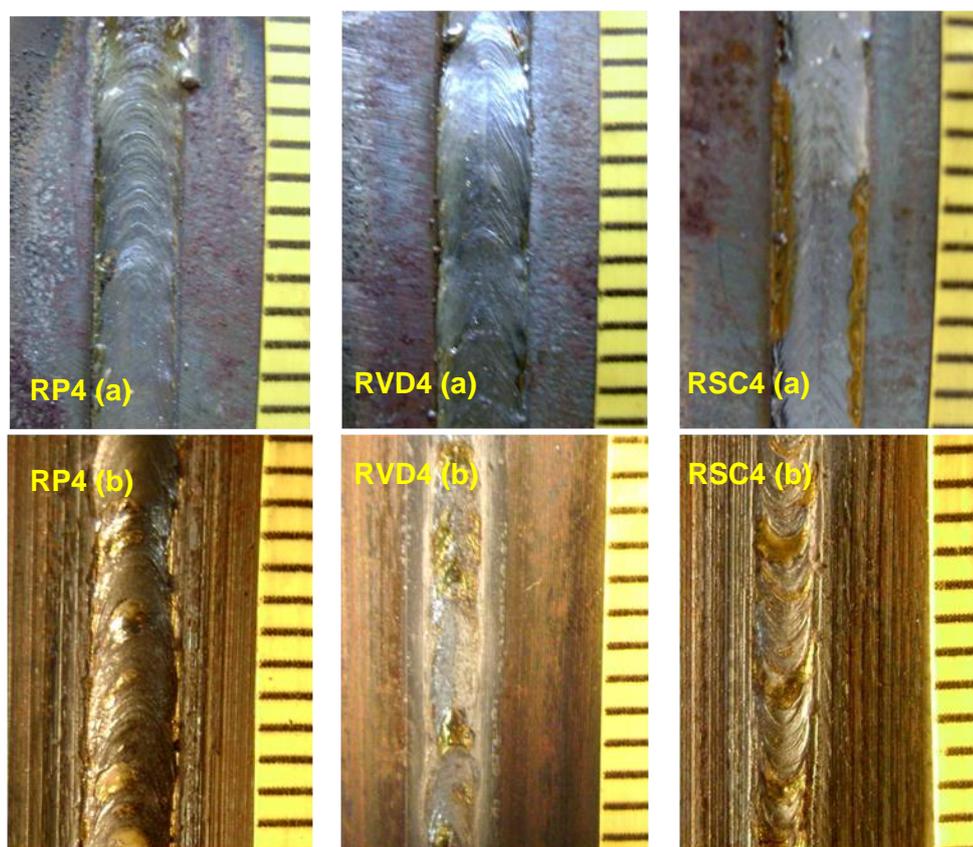


Figura 5.21 – Formato da (a) face e (b) raiz, dos cordões obtidos no processo de soldagem circunferencial, sem cobre-junta, com espessura de nariz de 1,65 mm para o processo RMD (divisão da escala é de 2 mm)

Após isto, uma análise de macrografia foi realizada para verificar a seção transversal do cordão nestes pontos, sem defeitos internos. A Fig. 5.22 apresenta estas seções transversais.

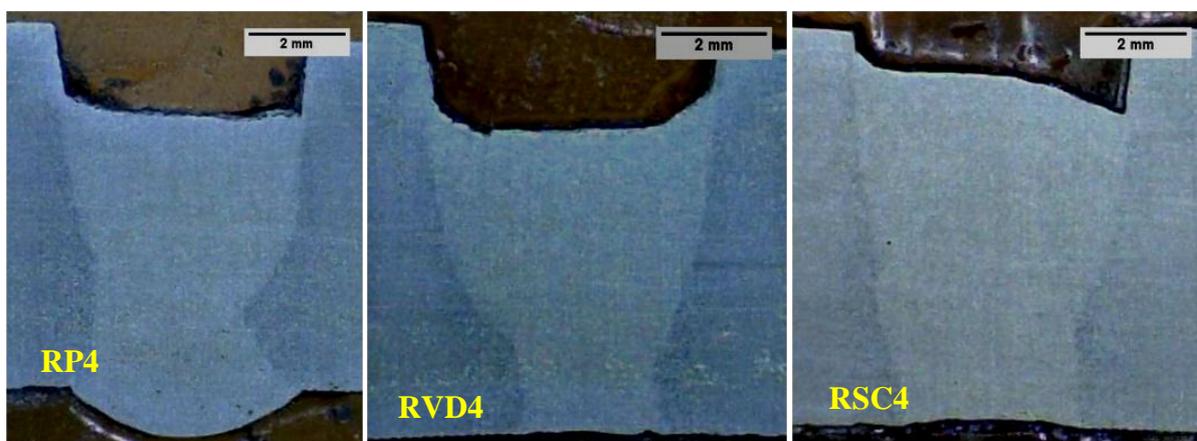


Figura 5.22 – Seção transversal do passe de raiz obtido na soldagem circunferencial, nos pontos onde se encontram as posições RP4, RVD4 e RSC4 com RMD

Pode-se verificar, da Fig. 5.22, que a seção transversal do cordão de solda, de passe de raiz, não apresenta defeitos internos em nenhum dos pontos onde se ubicam as posições plana, vertical e sobrecabeça, apresentando um formato similar aos apresentados na Fig. 5.16 (2ª etapa), e nas Fig. 5.19 e Fig. 5.20 (3ª etapa).

Com estes resultados pode-se dizer que a metodologia proposta, “Metodologia da junta com nariz inclinado”, e o bom funcionamento do “simulador” apresentam-se validados, também para este processo (RMD).

5.3 – RESULTADOS PARA O PROCESSO CMT

5.3.1 – Resultados da 1ª etapa com CMT – Parametrização

Na fonte da FRONIUS, com o processo CMT selecionado, os parâmetros que podem ser regulados são a velocidade de alimentação e a tensão, representada como comprimento do arco. Sendo que a velocidade de alimentação é mantida constante (4,5 m/min), só poderá ser regulado o comprimento do arco, que será usado para encontrar o envelope de trabalho. Durante a realização dos testes, percebeu-se que o processo apresentou uma transferência estável, constante e sem respingos em toda a faixa de regulagem. Com isto o envelope de trabalho será a mesma faixa de regulagem, deste parâmetro, que a fonte permite regular. Foi considerando um valor médio para montar um planejamento experimental de 1 variável e 3 níveis, assim, cada valor da variável será uma corrida. A Tab. 5.9 representa o envelope de trabalho e o planejamento experimental a ser efetivado. A definição e efeito deste parâmetro durante a deposição do cordão de solda e no oscilograma de corrente são apresentados no item 2.5.3.

Tabela 5.9 – Faixa de regulagem da variável, nível do envelope de trabalho e matriz de planejamento para o processo CMT

	Mínimo Corrida 1	Médio Corrida 2	Máximo Corrida 3
Comprimento do arco	- 30	0	+30

Com as chapas fixadas e posicionadas, e considerando-se os parâmetros já estabelecidos procedeu-se à execução das corridas da Tab. 5.9, realizando-se uma réplica de cada corrida.

Durante a realização dos cordões de solda, percebeu-se que com os valores menores (-30 e 0), da Tab. 5.9, os cordões apresentaram desvios, isto é, foram depositados em maior quantidade numa das paredes da junta. Já com o valor de +30 o cordão foi depositado corretamente, preenchendo o total do chanfro. A Fig. 5.23 mostra o cordão desviado depositado com o valor de comprimento de arco de -30, motivo de descarte da corrida respectiva.

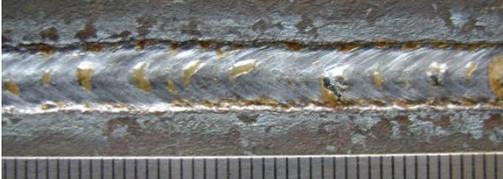


Figura 5.23 – Cordão desviado para o valor de comprimento de arco -30 com CMT

Perante a análise visual dos cordões depositados, se determinou que a corrida n° 3 (comprimento de arco de +30) forneceu os cordões com melhor aspecto tanto na face como na raiz dos mesmos, sendo com isto considerada como a corrida apropriada para ser usada nas etapas posteriores. Na Tab. 5.10, são mostrados os formatos da face e raiz, dos cordões obtidos nesta corrida.

Após isto, um ensaio de macrografia foi realizado nos três cordões, da corrida 3, com o intuito de verificar uma seção transversal sem defeitos internos. A Fig. 5.24, mostra a seção transversal destes cordões de solda.

Tabela 5.10 – Aspecto da face e raiz dos cordões de solda obtidos com a corrida n° 3, em chapas de 6,3 mm de espessura, com cobre-junta e nas três posições, com CMT

Posição	Im [A]	Um [V]	Formato do cordão
CP3 (Face)	166,3	18,2	
CP3 (Raiz)			
CVD3 (Face)	162	19	
CVD3 (Raiz)			
CSC3 (Face)	176,3	16,3	
CSC3 (Raiz)			

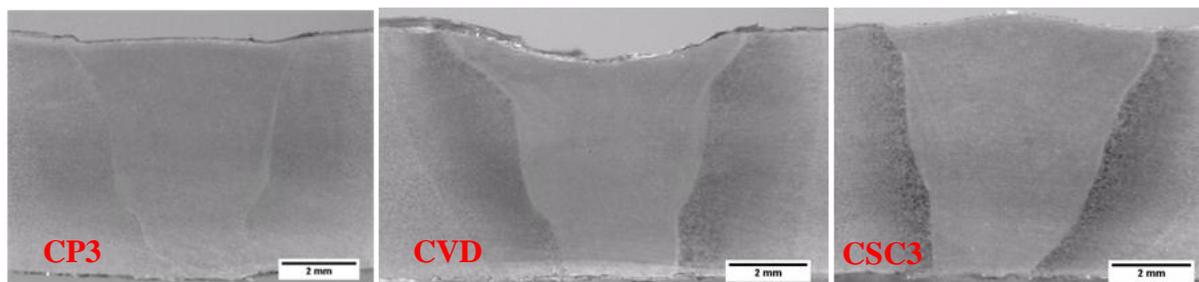


Figura 5.24 – Seção transversal dos cordões de passe de raiz obtidos com os parâmetros da corrida n° 3 do planejamento experimental para o processo CMT

Da Fig. 5.24, pode-se ver que a seção transversal dos cordões mostram um preenchimento total da junta, com penetração total atingida em cada umas das posições testadas, além de não apresentar defeitos internos.

Os oscilogramas de tensão e corrente da corrida n° 3 da Tab. 5.9, são mostradas na Fig. 5.25.

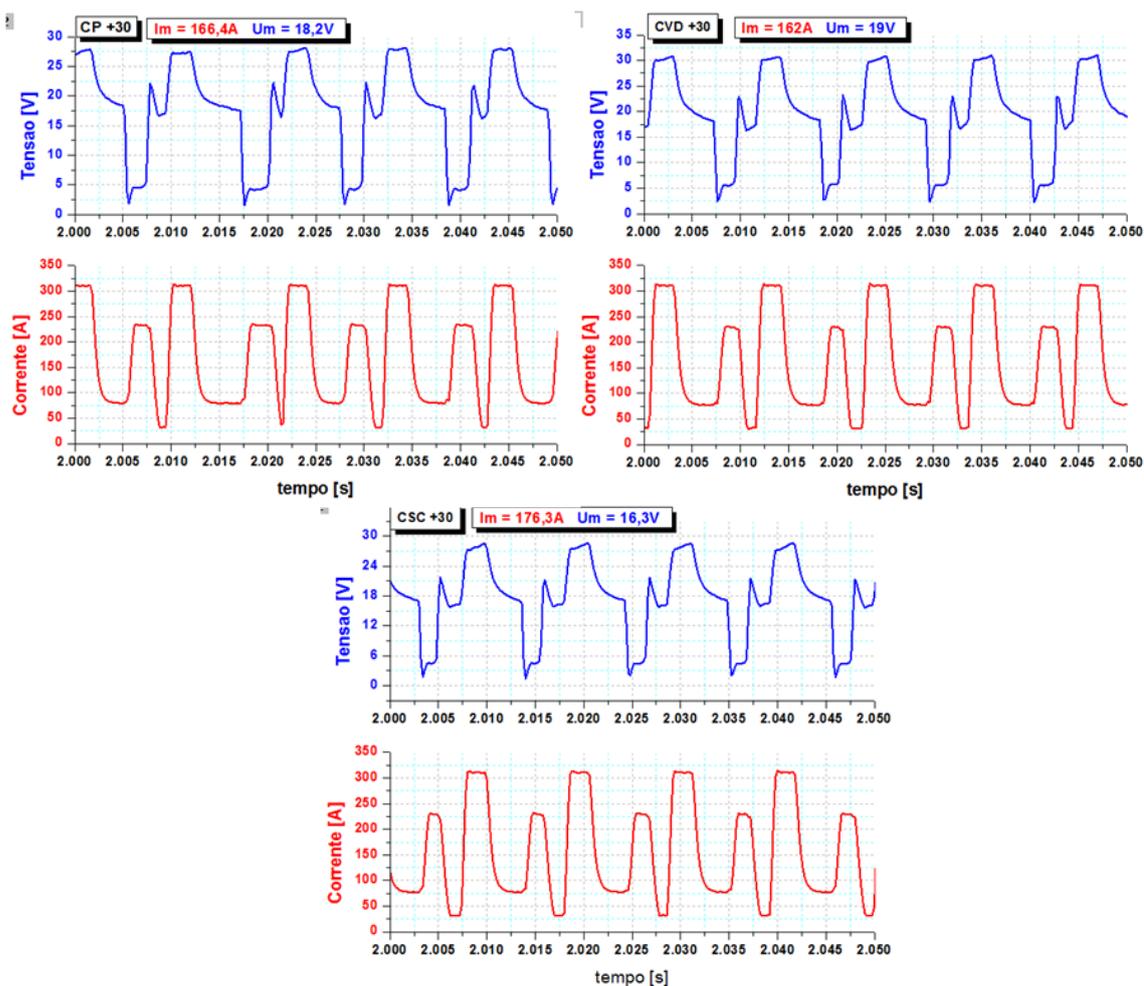


Figura 5.25 – Oscilogramas de tensão e corrente da corrida n° 3 do planejamento CMT, nas posições plana, vertical e sobrecabeça.

5.3.2 – Resultados da 2ª etapa com CMT – Chanfro inclinado

Com as chapas de testes já prontas, fixadas e posicionadas como na Fig. 3.3, considerando os parâmetros da corrida n° 3, da Tab. 5.9, e os parâmetros de soldagem já determinados, a deposição do cordão foi realizada.

Durante a realização da soldagem, percebeu-se que os três cordões depositados sofreram desvios, isto é, foram depositados numa maior quantidade para um lado das paredes do chanfro, no entanto, a penetração total foi conseguida. A Fig. 5.26, mostra a face do cordão depositado, desviado, nas placas de teste com nariz inclinado, pode-se ver nesta figura que quando o cordão começa a ser depositado, nariz de 4 mm, não existe desvio do cordão por que a parede lateral para desviá-lo é mínima, mas assim que o tamanho do nariz diminui a parede do chanfro aumenta e o cordão começa a desviar. Por este motivo, na 1ª etapa (parametrização), este defeito não aconteceu por que a espessura da chapa era de 6,3 mm.



Fig. 5.26 – Face do cordão desviado depositado na junta com nariz inclinado para o valor de comprimento de arco de +30 com CMT

Muitos testes foram realizados, mas o problema do desvio do cordão depositado continuava, então, foi decidido dar continuidade ao trabalho pensando-se que o nariz inclinado podia ter influência nesta etapa do trabalho, toda vez que a penetração total foi atingida. Assim, se analisou o ponto de penetração total conseguido nestas chapas de teste. Como nos casos anteriores, se obteve diferentes pontos de penetração total para cada posição. Novamente na soldagem na posição vertical, no sentido descendente, a penetração foi menor em comparação com as outras posições, sendo considerada com válida para a construção da nova configuração de junta. A Fig. 5.27, mostra as placas de teste com os pontos de penetração total.

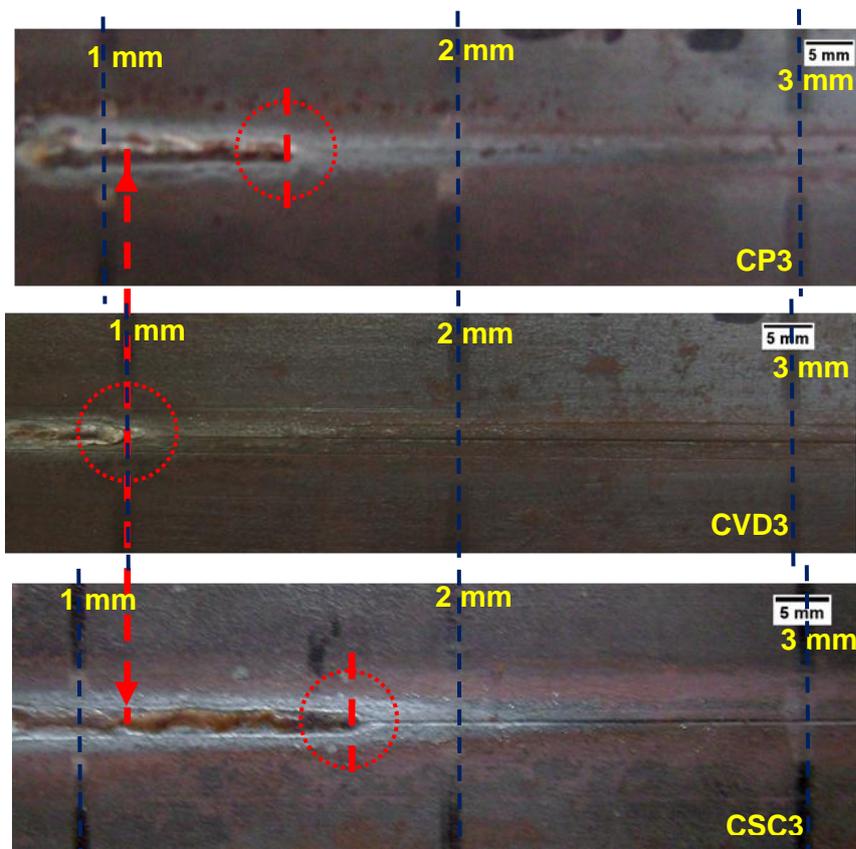


Figura 5.27 – Parte inferior da junta com nariz inclinado após o processo de soldagem com CMT ressaltando-se com círculos os pontos onde a penetração total se inicia para cada posição

Pode-se ver na Fig. 5.27, que na placa de teste CVD3, o ponto de penetração total inicia exatamente sobre a linha onde a espessura de nariz é de 1,0 mm. Desde este ponto, prolongando-se a linha vermelha sobre a linha de penetração da CP3 e CSC3, se tem uma idéia do comportamento do reforço da raiz nas outras posições de soldagem, quando da validação desta metodologia.

Logo, considerando o valor encontrado, de 1,0 mm, foram preparadas as novas placas de teste. A Fig. 5.28 mostra o novo formato da junta a ser usada, considerando esta espessura de nariz encontrado.

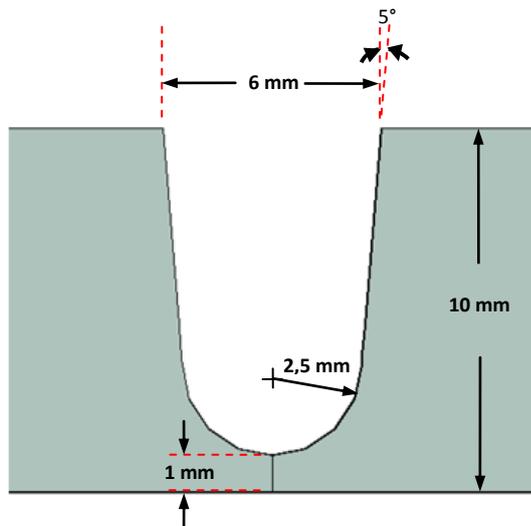


Figura 5.28 – Dimensões da junta considerando o tamanho de nariz de 1,0 mm encontrado pela metodologia proposta para o processo CMT

A seguir, com as placas de teste já preparadas e fixadas nas posições respectivas, a soldagem foi realizada considerando-se os parâmetros estabelecidos e o valor da corrida n° 3 da Tab. 5.9.

A Fig. 5.29 mostra a face e raiz dos cordões de solda depositados na nova junta. Pode-se ver que estes cordões resultaram desviados, maior deposição sobre uma das paredes da junta, mas teve-se penetração total ao longo do comprimento da chapa.

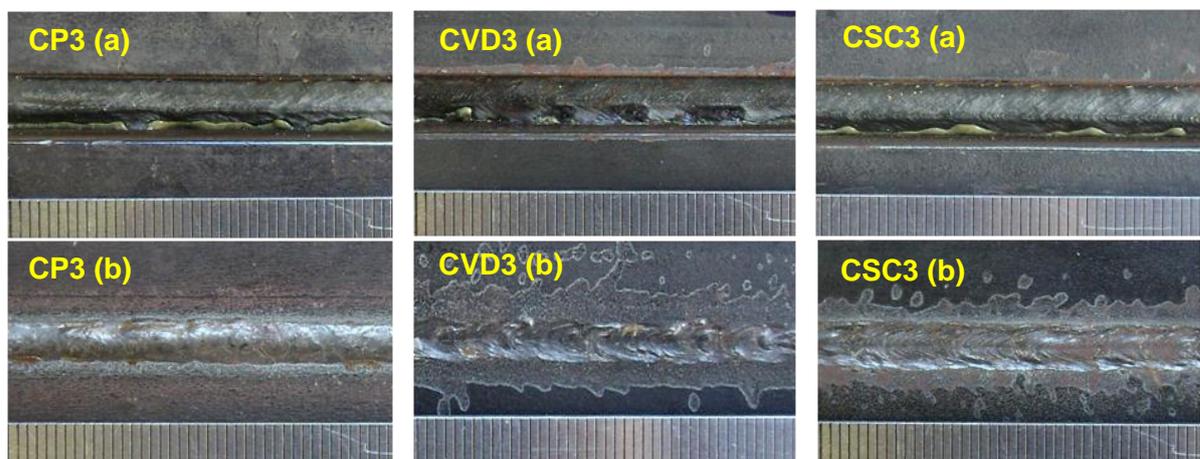


Figura 5.29 – Aspectos dos cordões desviados, embora com boa penetração, depositados em chanfro com nariz de 1 mm, em chapas de 10 mm de espessura, em junta sem cobre-junta com o CMT

Os testes foram repetidos muitas vezes acontecendo sempre o mesmo defeito, desvio do cordão. Foi pensado em diferentes motivos que poderiam ocasionar este desvio, como enumerados a seguir:

- Pensou-se que poderia ser efeito do cabo terra, sopro magnético, então o cabo terra foi mudado de posição em 90°, 180° e 270°;
- Teve-se maior cuidado na programação do robô desde o ponto inicial até o ponto final da soldagem, isto é, se verificou o deslocamento do arame sobre a linha de encosto entre as chapas em todo o percurso da solda, comprimento da chapa;
- Foi medido, com um nível, qualquer inclinação na mesa do “suporte”, quando da fixação e posicionamento das chapas nas 3 posições de soldagem;
- Foi verificado se a abertura superior da junta, neste caso, apróx. 6 mm, era constante ao longo da placa de teste;
- Se verificou que a taxa de deposição com CMT é a mesma que os processos STT e RMD;
- Se corrigiu o possível desvio do arame, na saída do bico de contato, por meio de um “endireitador de arame” (Fig. 5.30).

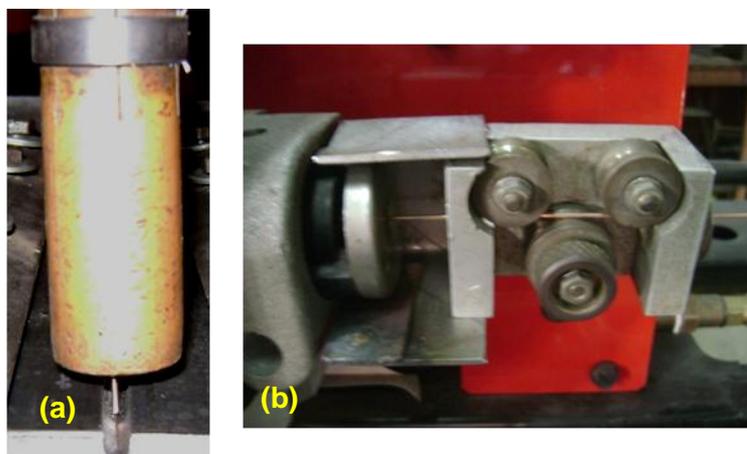


Figura 5.30 – Arame com (a) saída reta do bico de contato, (b) por correção com o “indireitador de arame”

Todos os possíveis problemas enumerados foram verificados e corrigidos, mas o desvio do cordão continuava acontecendo.

A seção transversal dos cordões da Fig. 5.29, são mostradas na Fig. 5.31, com o intuito de mostrar em detalhe o desvio destes cordões.

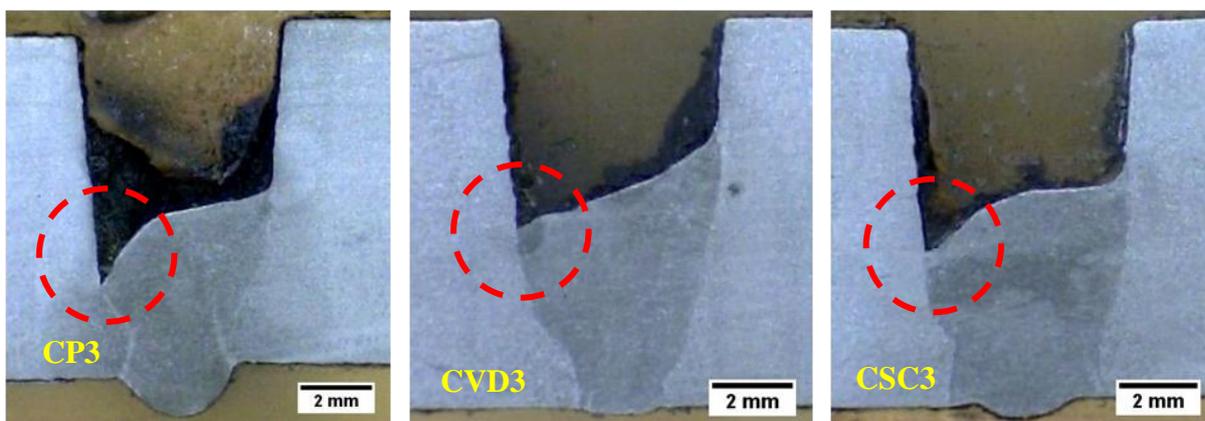


Figura 5.31 – Seção transversal dos cordões desviados de passe de raiz, realizados para validar a espessura de nariz de 1,0 mm depositados com CMT em chapas com largura de junta de 6 mm

Pode-se ver nesta Fig. 5.31, o desvio dos cordões depositados para estas condições e para estas dimensões de junta. Esta inclinação do cordão depositado origina pontos ou espaços estreitos entre o cordão e a parede da junta, ressaltado com círculo vermelho, que podem ocasionar defeitos quando o próximo passe seja depositado. Embora aconteça o desvio dos cordões, a penetração total foi conseguida.

Mesmo com este defeito, deu-se continuidade para a próxima etapa.

5.3.3 – Resultados da 3ª etapa com CMT – Simulação

O processo de simulação física foi realizado no formato de junta que usa cobre-junta considerando os parâmetros de soldagem estabelecidos e os parâmetros da corrida 3 da Tab. 5.9. A Fig. 5.32 mostra o formato da face e raiz do cordão, obtido neste processo, nos pontos onde a posição é plana, vertical e sobrecabeça, segundo o posicionamento dos corpos de prova mostrado na Fig. 3.13, em junta com cobre-junta.

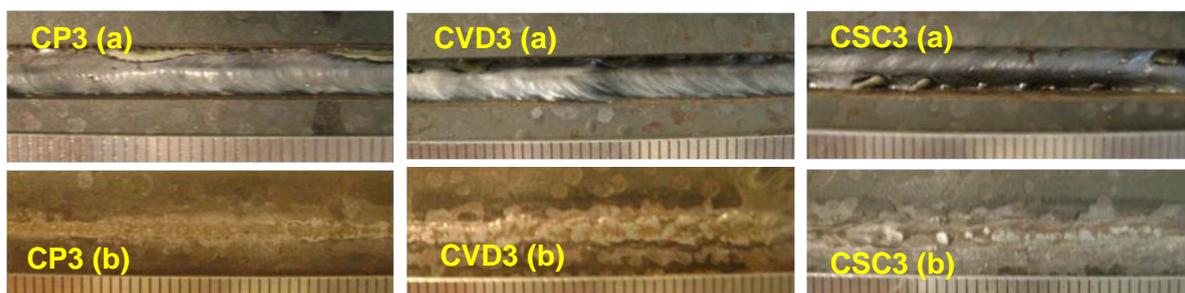


Figura 5.32 - Formato da (a) face e (b) raiz dos cordões de solda obtidos no processo de simulação em chapa de 10 mm de espessura, em junta com cobre-junta, com CMT

Pode-se ver nesta figura o mesmo defeito de desvio do cordão, como era de se esperar, nas 3 posições mostradas. Ainda aqui, pode-se ver falta de penetração no ponto onde a posição é sobrecaabeça (CSC3). O teste de macrografia neste caso, com estes defeitos, não tem sentido.

Considerando que, os problemas enumerados no item anterior foram corrigidos e o desvio continuava acontecendo, pensou-se então que o problema era o espaço entre as paredes das chapas, no chanfro estreito, toda vez que em chapas de menor espessura (6,3 mm), usadas na 1ª etapa, também acontecia este defeito mas, aqui, o arco com o maior valor (+30) abrangia quase/ou toda essa abertura diminuindo com isto os desvios, o que seria similar a quando o cordão de solda era depositado sobre chapas planas, na etapa de parametrização, onde não se tinha desvios por que não havia nenhuma parede de metal, do lado do arco, para ocasionar este desvio.

Com isto, foi pensando em aumentar a distância entre as paredes da junta, aumentando a medida da abertura superior da chapa, mas mantendo-se a inclinação de 5°. Não se sabendo, em quanto ia se aumentar a distância, decidiu-se que passaria de uma largura de junta de 6 mm, para uma largura de junta de 7 mm, aumentando para isto em 0,5 mm a largura do nariz, em cada chapa. Estas modificações são mostradas na Fig. 5.33, onde as modificações estão ressaltadas por um elipsóide tracejado.

Assim, estando na etapa de simulação, a nova configuração de junta (Fig. 5.33), foi usada nas chapas de teste para este processo. A seguir, as placas foram fixadas no simulador e o processo de soldagem foi realizado, tendo em consideração os parâmetros estabelecidos.

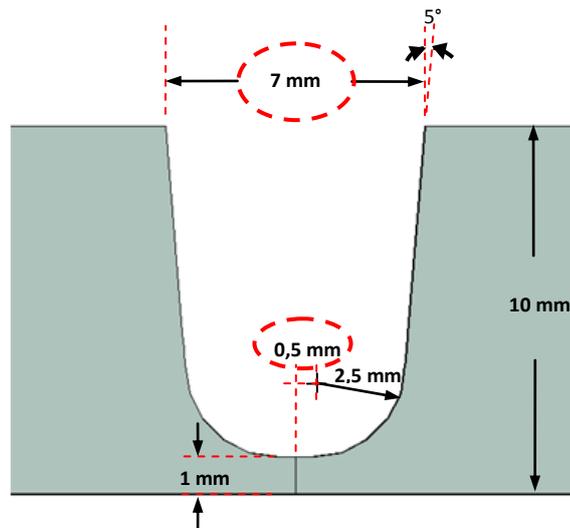


Figura 5.33 – Modificações realizadas na largura do nariz resultando numa maior abertura na largura da junta, ressaltadas pelo elipsóide tracejado

A Fig. 5.34, mostra a face e a raiz do cordão de solda depositado neste chanfro, nos pontos onde se encontram as posições plana, vertical e sobrecabeça, como representado na Fig. 4.13.

Pode-se verificar na Fig. 5.34, que o cordão apresenta uma boa face, sem desvios obtendo-se também penetração total e homogênea ao longo do cordão depositado.

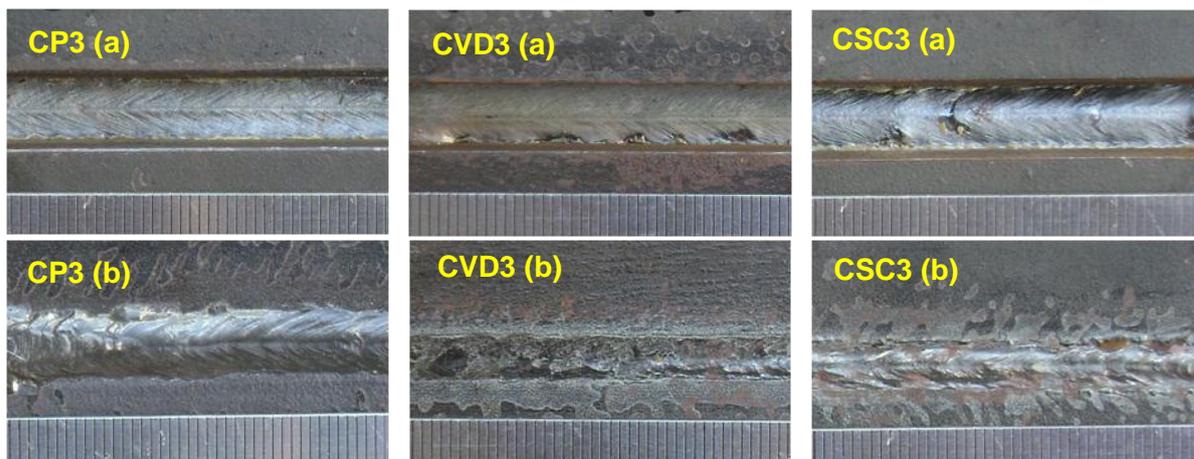


Figura 5.34 – Aspectos (a) da face e (b) da raiz dos cordões de solda obtidos em junta de 10 mm de espessura, no processo de simulação com nariz de 1,0 mm, com largura de junta de 7,0 mm e sem cobre-junta, com CMT

Pensou-se então, aproveitar as chapas de teste com estas medidas, para fazer um teste analisando o efeito dos outros valores do comprimento do arco: -30 e 0, neste tamanho de largura de junta.

Este teste foi realizado na posição plana, e para isto, foi programado o percurso do robô considerando o comprimento total da chapa de teste. As chapas foram dividida e marcadas em 3 comprimentos iguais, que será o comprimento do cordão a ser depositado. Assim, foi colocado o valor de -30, na fonte, e a soldagem foi realizada no ponto inicial da programação. Quando o arco atingiu a primeira distância marcada foi acionado no controlador do robô o comando “*hold*”, o que detem o funcionamento do robô sem modificar a programação. Então, foi modificado o valor de -30 para 0, na fonte, e o controle automático do robô foi acionado, continuando com o percurso já programado. Isto foi repetido para colocar o valor de +30 e finalizar o processo de soldagem. A Fig. 5.35 mostra os resultados do teste. Aqui, o comprimento total da chapa de teste foi montada em três partes para poder mostrar um tamanho maior dos cordões.

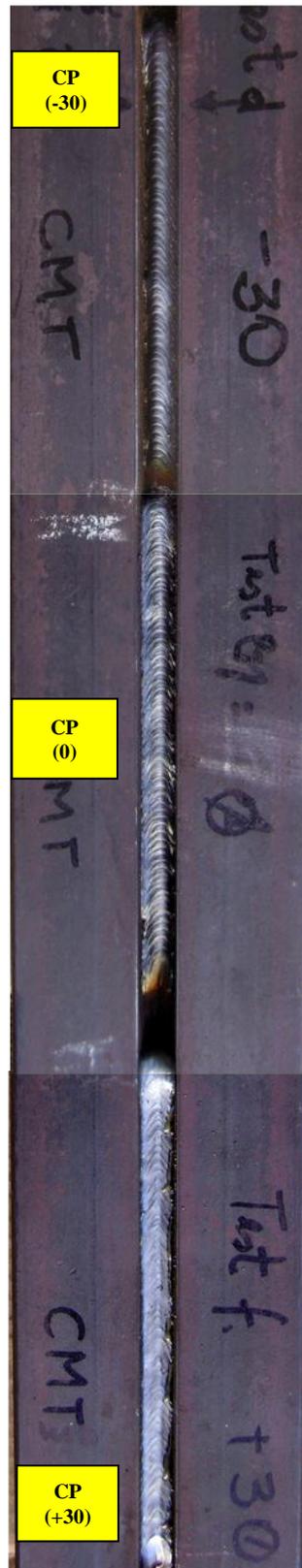


Figura 5.35 – Efeito dos 3 valores de comprimento do arco: -30, 0 +30 na deposição do cordão na placa de teste com largura de junta de 7 mm

Pode-se ver na Fig. 5.35, que quando o comprimento do arco é menor, -30 e 0, o cordão é depositado com desvio, isto confirma que valores menores de comprimento de arco fazem o arco mais concentrado e mais forte no fundo do chanfro, para esse comprimento de arco, mas quando o arame recua, característica da fonte CMT, o arco fica maior, instável e fraco, toda vez que não foi calibrado para esse tamanho, assim fica susceptível a desvios, mesmo para esta nova largura de junta. Já quando o comprimento do arco é maior, +30, este abrange uma área mais larga na superfície da chapa, neste caso no chanfro estreito, calibrado para esse tamanho e com isto o movimento de recuo do arame tem menor efeito.

A seguir, um ensaio de macrografia foi realizado verificando a falta de defeitos internos na seção transversal dos corpos de prova da Fig. 5.36, validando as novas medidas da junta e o procedimento proposto.

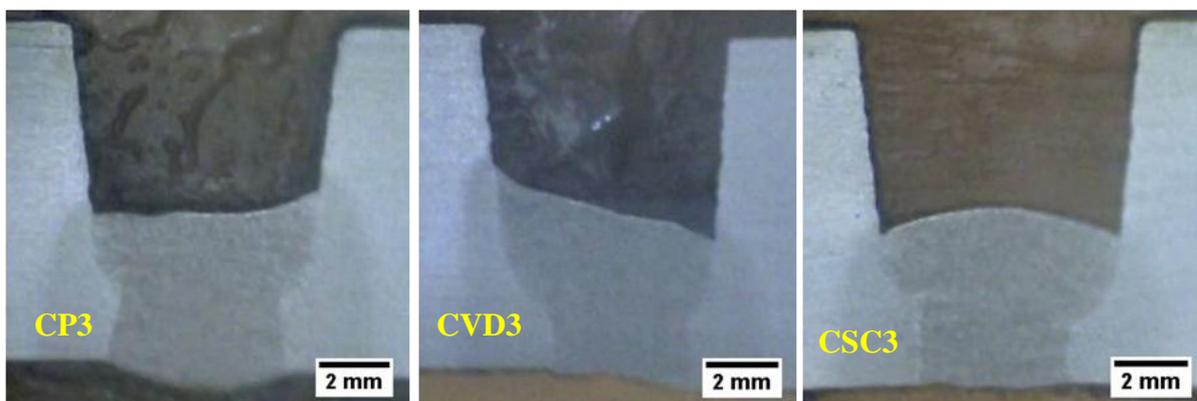


Figura 5.36 - Seção transversal do cordão, realizado com o processo de simulação em junta sem cobre-junta, com largura de junta de 7 mm, em pontos onde se encontram as posições CP3, CVD3 e CSC3, com CMT

Pode-se perceber da Fig. 5.36, que com esta modificação na largura do chanfro, abertura superior, os cordões saem centralizados, sem desvios, embora se mostre uma leve inclinação na CVD3. O formato do cordão na CP3 apresenta boa face e leve reforço na raiz e na CSC3, a face ficou levemente convexa, mas, acredita-se que sem influência para defeitos quando o próximo passe seja depositado.

Esta modificação da medida da junta foi realizada para juntas que não usa cobre-junta. Sabendo-se dos testes anteriores, nos outros processos, que em junta que usa cobre-junta os

resultados são similares aos que não usam cobre-junta, não se fez a simulação em junta com cobre-junta pelo resultado óbvio desse ensaio.

5.3.4 – Resultados da 4ª etapa com CMT – Soldagem circunferencial

Nesta etapa, os tubos foram cortados, usinados, chanfrados e unidos entre eles segundo o procedimento experimental. A espessura de nariz contruído no tubo foi de 1,0 mm, encontrado na 2ª etapa, para o processo CMT, considerando-se uma abertura superior de 7 mm. Posteriormente, os tubos foram montados no sistema de fixação junto ao Tartílope, como mostrado na Fig. 4.10, e a soldagem foi realizada, considerando todos os parâmetros estabelecidos. A Fig. 5.37, mostra a face e raiz do cordão depositado nos tubos, nas posições plana, vertical e sobrecabeça, respectivamente, como representado na Fig. 4.13.

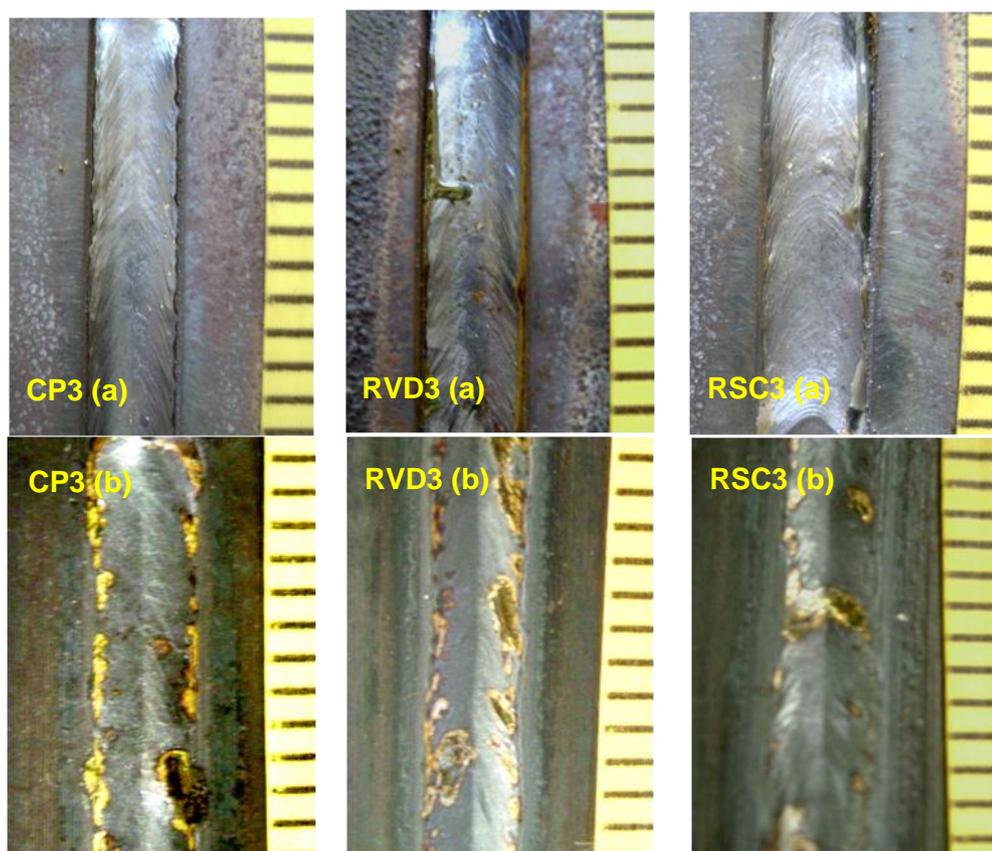


Figura 5.37 – Formato da (a) face e (b) raiz do cordão obtido no processo de soldagem circunferencial, sem cobre-junta, com espessura de nariz de 1,0 mm e largura de junta de 7,0 mm, para o processo CMT (a divisão da escala é de 2 mm)

A seguir, uma análise de macrografia foi realizada para verificar a seção transversal do cordão sem defeitos internos. O cordão depositado foi cortado obtendo-se os corpos de prova segundo o posicionamento da Fig. 4.13. As seções transversais destas posições são mostradas na Fig. 5.38.

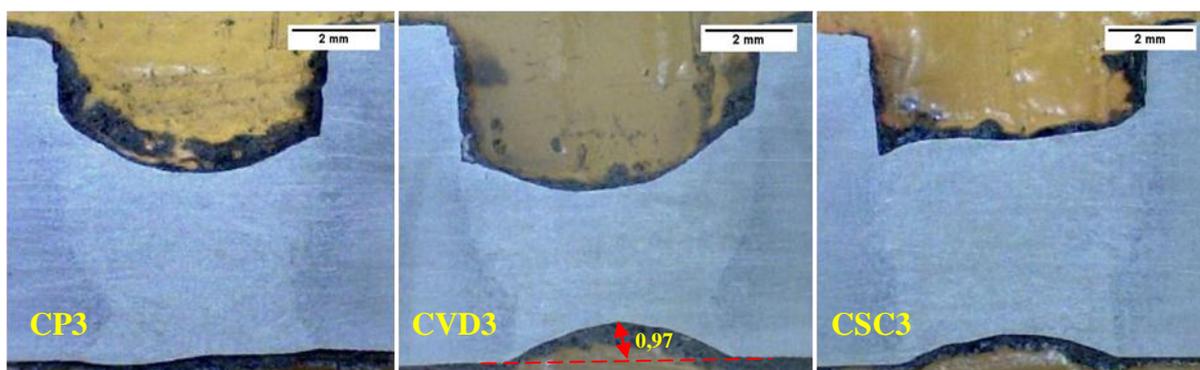


Figura 5.38 – Seção transversal da soldagem circunferencial, com o CMT, em pontos onde as posições são plana, vertical e sobrecabeça

Da Fig. 5.38, pode-se ver primeiramente que a seção transversal do cordão, nestas três posições não apresenta defeitos internos. As faces nas posições CP3 e CVD3 se apresentam em um formato côncavo. A CSC3 apresenta uma leve convexidade em um lado, mas acredita-se que não tenha maior influência quando o próximo passe seja depositado.

A raiz na posição CVD3 e CSC3, mostram o defeito chamado de concavidade interna. Acredita-se que este defeito foi originado pelos motivos explicados a seguir:

- Primeiro, o tamanho de nariz encontrado na 2ª etapa (método do chanfro inclinado), em chapa plana, foi considerado de 1 mm, mas, com o desvio que a largura da junta de 6 mm ocasionava quando depositado o cordão com o CMT. Se o cordão tivesse sido depositado, nessa 2ª etapa, numa largura de junta de 7 mm, largura com a qual não se tem desvio do cordão, o tamanho de nariz poderia ter sido maior.
- Segundo, o teste da 2ª etapa, foi realizado em chapas de 10 mm de espessura, já no tubo, a espessura é aproximadamente de 7,8 mm. Isto origina maior aquecimento no metal de base.
- Terceiro, com a largura da junta aumentada para 7 mm, o arco age diretamente no nariz da junta, aportando maior calor nessa área.

Com a modificação da largura da junta de 6,0 mm, para 7,0 mm, todos estes efeitos agem em conjunto sobre o tamanho do nariz, sobreaquecendo-o e originando com isto a concavidade interna. Ainda com estas modificações e efeitos, a medida da concavidade interna ficou de 0.97 mm. Esta medida é menor que o tamanho de nariz, de 1 mm medido na seção transversal CVD3, da Fig. 5.38, sendo por tanto aceitável, segundo o comentado ao respeito da Fig. 2.15.

Com estes resultados pode-se dizer que a metodologia proposta, “Metodologia da junta com nariz inclinado”, e o bom funcionamento do “simulador” estão validados, também para este processo (CMT).

5.4 – RESULTADOS PARA O PROCESSO CURTO-CIRCUITO CONVENCIONAL

Para esta etapa, o processo de curto circuito convencional foi selecionado na fonte da LINCOLN, utilizada também para o processo STT, a qual permite a regulagem da tensão e do efeito indutivo, que é um valor numérico adotado pelo fabricante. A faixa de valores usadas neste teste é apresentada na Tab. 5.11. Assim, com a metodologia apresentada anteriormente e considerando os parâmetros de soldagem já determinados, se encontrou o envelope de trabalho mostrado na Tab. 5.12. Aqui também foi considerando um valor médio para montar um planejamento fatorial cuja matriz, com as corridas na forma aleatória, é apresentada na Tab. 5.13.

Tabela 5.11 – Faixa de valores das variáveis usadas para encontrar o envelope de trabalho no curto circuito convencional

	Mínimo	Máximo
Tensão [V]	15	24
Efeito Indutivo	0	10

Tabela 5.12 – Envelope de trabalho para o processo curto circuito convencional.

	Mínimo	Médio	Máximo
Tensão [V]	19	21	23
Efeito Indutivo	2	6	10

Tabela 5.13 – Planejamento experimental completo, aleatório, para o processo curto circuito convencional.

Corrida	Tensão [V]	Efeito Indutivo
5	21	6
6	21	10
8	23	6
9	23	10
4	21	2
3	19	10
7	23	2
2	19	6
1	19	2

Assim, com as placas de teste já prontas, fixadas e posicionadas e considerando-se os parâmetros estabelecidos, a execução das corridas da Tab. 5.13, foram realizadas considerando-se uma réplica de cada corrida.

A seguir, algumas discussões pertinentes:

A execução das corridas foram realizadas primeramente no sentido vertical descendente. Percebeu-se durante esta soldagem que o metal líquido escorregava muito, inclusive escorregando até um ponto, mas embaixo que o ponto onde arco estava posicionado, isto aconteceu em quase todas as corridas. Após estes testes, foi realizada uma análise visual onde foi verificado que não se conseguiu nada de penetração em nenhuma das placas de testes. Segundo o procedimento de análise visual, adotado e explicado na metodologia, isto elimina todas as corridas. O problema principal neste processo de soldagem é a falta de abertura da raiz, pois não foi encontrado na literatura soldagem de passe de raiz com este processo em junta de topo, sem abertura de raiz.

Considerando que o formato de junta usado nesta 1^a etapa apresenta um tamanho de nariz de 0,5 mm, se decidiu não utilizar este processo nos testes posteriores, toda vez o tamanho de

nariz nesta junta já é pequeno, não tendo sentido determinar um tamanho de nariz menor ainda.

Com relação ao equipamento de soldagem circunferencial (Tartilope V4), por ser o primeiro protótipo desenvolvido, teve-se dificuldades na sua colocação em funcionamento, tanto na parte mecânica, estrutural, como na parte de software. No decorrer desta etapa, o equipamento teve-que ser despachado três vezes, para o fabricante, com motivos de atualizações e correções dos defeitos, tendo-se que, após cada atualização, se fazer novos testes e novas calibrações. Esta etapa durou praticamente um ano, finalmente os consertos e modificações foram realizadas como parte do trabalho de mestrado. Cabe ressaltar, que ainda nos tempos atuais, problemas no funcionamento deste equipamento acontecem dificultando o desenvolvimento das pesquisas.

Na etapa do processo de simulação na soldagem com CMT, o metal depositado ou altura do cordão do passe de raiz, ficou menor com relação a altura depositada pelos outros processos de soldagem. Isto devido à mudança na largura de junta, de 6,0 mm para 7,0 mm, o que fez aumentar a área a ser preenchida, mas com a mesma taxa de deposição.

6 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Pelos resultados apresentados, considera-se que os objetivos propostos neste trabalho foram atingidos, isto é, construção e validação do SDR usado para simular soldagem circunferencial usando-se chapas planas como metal de base, avaliação de processos MIG/MAG derivativos no passe de raiz utilizando este simulador e a execução e validação da “Metodologia da junta com nariz inclinado”, usada para encontrar a espessura de nariz adequado para passe de raiz, sem usar abertura de raiz nem cobre-junta, numa soldagem externa de topo.

6.1 – SOBRE A 1ª ETAPA - PARAMETRIZAÇÃO

- Pode-se verificar que para realizar uma soldagem circunferencial é importante primeramente realizar uma parametrização, isto é, realização de testes nas três posições críticas ou diferenciadas durante esta soldagem: posição plana, vertical no sentido descendente (ou ascendente) e sobrecabeça, em chapas planas.

- Esta parametrização, verificou, neste trabalho, um mesmo conjunto de parâmetros de soldagem ou corridas, adequados para a soldagem nas três posições estudadas, o que permitirá realizar uma soldagem circunferencial sem necessidade de modificar ou mudar os parâmetros quando da mudança da posição da tocha de uma soldagem plana para uma soldagem vertical descendente e para uma posterior soldagem de sobrecabeça, nessa sequência e em forma contínua, sem paradas nem interrupções.

- De certa forma, este processo de parametrização, quando bem realizado, é uma forma de controlar a realização do passe de raiz, no que respeita a penetração e bom formato do cordão, de uma forma bem prática, sem precisar de controles automatizados e/ou eletrônicos, quando das mudanças de posição durante o percurso da tocha ao redor do tubo, como exposto por alguns autores.

- Finalmente, pode-se dizer que o processo de parametrização, neste trabalho, foi realizado satisfatoriamente e teve-se os resultados esperados.

6.2 – SOBRE A 2ª ETAPA – METODOLOGIA DA JUNTA COM NARIZ INCLINADO

- Para a deposição do cordão de solda na junta com chanfro inclinado, deverá ser considerada uma espessura de chapa similar à espessura da chapa do metal de base que será utilizada nos testes finais. Mudanças neste quesito podem disfarçar resultados devido à maior ou menor perda de calor da poça de fusão, absorvida pela maior ou menor espessura do metal de base.
- O formato da junta com o nariz inclinado, deverá ser o mesmo formato da junta a ser usada nas chapas de metal de base.

6.3 – SOBRE A 3ª ETAPA – PROCESSO DE SIMULAÇÃO

- Este processo foi validado quando se comparou com a soldagem em chapa plana e posteriormente com a soldagem circunferencial, com as mesmas condições de soldagem, para os processos STT, RMD e CMT.
- A realização de um bom processo de simulação, além do bom funcionamento do simulador, depende dos parâmetros de soldagem adequados para cada configuração de junta e para cada processo de soldagem.
- O simulador, permite realizar a simulação física de passe de raiz tanto pela parte interna como pela parte externa do tubo.
- Uma vez que o simulador (SSDR) foi validado, pode ser aproveitado para analisar, com maior facilidade, o processo de penetração pela parte inferior das chapas, durante todo ou qualquer parte específica do processo de simulação de soldagem circunferencial, usando-se, por exemplo, câmara de alta velocidade.

6.4 – SOBRE A 4ª ETAPA – SOLDAGEM CIRCUNFERENCIAL

- A aplicação da espessura de nariz encontrado com a “Metodologia da junta com nariz inclinado”, foi validada perante o procedimento de transferir esta espessura, encontrada em chapas planas, para os tubos na soldagem circunferencial.

- Para a aplicação desta metodologia, em tubos, considerando o que foi testado neste trabalho, um bom alinhamento do diâmetro interno entre as seções dos tubos a serem soldados deve ser bem controlado.

6.5 – OUTRAS CONSIDERAÇÕES

- O suporte para soldagem automatizada em diferentes posições, de chapas planas, foi de muita utilidade para a realização das soldagens nas três posições: plana, vertical e sobrecabeça, facilitando a fixação e posicionamento das chapas, diminuindo o tempo gasto deste procedimento e garantindo uma maior repetitividade do processo de soldagem.

- Este suporte, ao igual que o “simulador”, pode ser utilizado para analisar o processo de penetração pela parte inferior das chapas, como mostrado na Fig. 3.7, comparando posições de soldagem, toda vez que este suporte não tem dispositivos de giro da mesa.

- Pelos resultados dos testes obtidos neste trabalho, pode-se assegurar que a soldagem na posição vertical, neste caso no sentido descendente, é a posição mais difícil de soldar no que a penetração se refere, isto devido ao fato de que a poça de fusão, sendo líquida, escorre interferindo entre o arco e o metal de base, diminuindo a profundidade de penetração.

- Os processos derivatidos de curto circuito se apresentaram apropriados para a realização do passe de raiz, faltando ainda explorar o máximo da fonte, o que está relacionado à velocidade de soldagem, como parâmetro principal neste trabalho.

- Pode-se deduzir das soldagens nos formatos de junta com e sem cobre-junta, que quando se utiliza cobre-junta, se está utilizando uma energia maior da necessária para conseguir a fusão da espessura do nariz (0,5 mm). Isto faz que o calor fornecido à peça de trabalho se espalhe, fundindo uma área maior do metal de base, além de originar uma alta temperatura na área de contato entre a poça líquida e o cobre da cobre-junta, facilitando inclusões pelo cobre na base do cordão.

- Na execução deste trabalho, em todas as etapas foram realizadas soldagens sem utilizar pré-aquecimento, diminuindo com isto tempo e despesas para o aquecimento do metal de base,

tendo em conta que Cooper et al, (2004) mostrou no seu trabalho que não precisou de pré-aquecimento quando da soldagem de aços de API 5L, embora tenha sido utilizado, neste desenvolvimento, tubos de grau X80 e o arame tubular autoprottegido.

- A análise de macrografia dos cordões realizados, em todas as etapas deste trabalho, foi uma ferramenta útil para verificar a falta de defeitos internos nas seções transversais dos cordões, nos pontos onde se encontram as posições plana, vertical e sobre-cabeça.

- A construção e montagem de acessórios adicionais na construção do simulador foram necessárias para um melhor funcionamento e controle do mesmo. Isto, logicamente, adiciona o tempo gasto nesta etapa.

6.6 - TRABALHOS FUTUROS

Como forma de sedimentar e expandir os conhecimentos obtidos durante o desenvolvimento desta tese e contribuir para o aumento da tecnologia da soldagem aplicada à construção de tubulações, sugere-se como possibilidade para trabalhos futuros:

- Analisar, usando-se o suporte para soldagem automatizada, o processo de penetração em diferentes posições de soldagem, perante filmagem e/ou câmera termográfica, em sincronismo com os sinais elétricos

- Realizar a simulação física do um passe de raiz, pela parte interna do tubo, com posterior preenchimento externo, fazendo-se micrografia.

- Analisar, usando-se o “simulador”, o processo de penetração nas mudanças consideradas críticas de posições em todo ou em qualquer trecho, durante a simulação de soldagem circunferencial.

- Realizar o processo de simulação para uma etapa completa de soldagem circunferencial, isto é, passe de raiz, enchimento e acabamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABS. **A importância da tecnologia de soldagem na construtabilidade de dutos terrestres e marítimos.** ABS – Revista de Soldagem, Ano II, n° 9, 6 – 17p. 2006.

ABS. **A soldagem GMAW (ou MIG – MAG).** ABS – Revista de Soldagem, Ano 1, n° 4, 6 – 17p. Disponível em: < <http://www.abs-soldagem.org.br/centraladm/docs/revistas/Ensino.pdf>>. Acesso em: Jan/2011.

ALBUQUERQUE, S. F., et al. **Estudo do comportamento do aço API 5L-X80 quando submetido à soldagem por processo automatizado.** Soldagem & Inspeção, São Paulo, Vol. 17, N° 2, p. 137 – 146, Abr/Jun 2012.

API 1104. **Welding of pipelines and related facilities.** 2000.

API 5L. **Specification for line pipe.** American Petroleum Institute. 2000.

ASME B31.1. **Process Piping. ASME Code for Pressure Piping, B31.** The American Society of Mechanical Engineers. Printed in U.S.A. 2005.

AWS. **Recommended Practices and Procedures fo Welding Low Carbon Steel Pipe.** AWS D10.12-89. Printed in The United States of America. 51p. 1989.

AWS A3.0. **Standard Welding Terms and Definitions.** 12th Edition. Printed in the United States of America, 162p. 2010.

AWS. **Welding Inspection Handbook.** Third Edition. Printed in the United States of America, 255p. 2000

BENYOUNIS, K. Y., OLABI, A. G. **Optimization of different welding processes using statistical and numerical approaches – A reference guide.** Advances in Engineering Software. N° 39, p. 483 – 496, 2008.

BLACKMAN, S. A. and DORLING, D. V. **Recent developments in high productivity welding processes for transmission pipelines.** Report Cranfield University. 13p. 2002.

BLACKMAN, S., YAPP, D. **CAPS – Cranfield Automated Pipe-welding System. Phase 1: Process Development and Performance.** Report Cranfield. 8p. 2001.

CARVALHO, R. S. **Robô CNC para automação da soldagem MIG/MAG em posições e situações de extrema dificuldade.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – Brasil. 121p. 2009.

CHU, K. P.: **Welding of sheet metal using modified short arc MIG/MAG welding process.** Lappeenranta University of Technology – Lappeenranta. 82 p. 2007.

CLARKE, T., GOOCH, R. **Rising to the Challenge.** OMS – Optical Metrology Services Ltda. Disponível em <www.omsmeasure.com>. Acesso em: 10/2011.

COOPER, R., SILVA, J.H.F, TREVISAN, R.E. **Influencia del precalentamiento en las propiedades de uniones soldadas de acero API 5L-X80 soldadas con alambre tubular autoprotegido.** Revista de Metalurgia. Madrid 40, p. 280 – 287, 2004.

DENNEY, E. A. K., BLACKMAN, S. **Developments in Pipeline Welding Offshore – A specifier’s view.** Report Cranfield University. 12p. 2002.

FEDELE, R. **Soldagem de tubulações: Metalurgia, procedimento e desafios.** Metalurgia & Materiais, Vol. 58, N° 521, 05 de 2002.

FORTES, C. **Arames Tubulares.** Apostila ESAB S/A. Contagem, 158p. 2004.

FRONIUS. **TransSynergic 4000/5000 – Transpuls Synergic 2700 – TransPuls Synergic 3200/4000/5000 – TIME 5000 Digital.** Manual de instruções. 2006.

GOMES, E. B. **Análise do comportamento da soldagem por curto-circuito aplicado ao processo eletrodo tubular através da metodologia Taguchi,** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 99 p. 2006.

GORNI, A. A., SILVEIRA, J. H. D., REIS, J. S. de S. **Metalurgia dos aços microligados usados na fabricação de tubos soldados com grande diâmetro.** Tubo & Companhia, 5:26, pág. 52 – 63, Set-Out 2009.

GRAF, M. K., et al. C. **High-strength large-diameter pipe for long-distance high pressure gas pipelines**. The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, May. 25 – 30, 2003.

HUDSON, M. G. **Welding of X100 linepipe**. Ph.D. Thesis, Cranfield University, 2004.

KVASOV, F. V. **Special features of mechanized welding with controlled electrode metal transfer**. Welding International. v. 14, n° 2, p. 158-161. 2000.

KIM, I. S., ET AL. **Sensitivity analysis for process parameters in GMAW processes using a factorial design method**. International Journal of Machine Tools Manufacturing, pp. 763 – 769. 2003.

LAMOND, J., and LEE, K. Y. **A cost effective root pass**. The 4th International scientific-professional conference. Cost Effective Application of Welding Processes and Welding Related Techniques in Manufacturing of Construction and Products. 335 – 344 p. Slavonski Brod, November 14 – 16, 2007.

LINCOLN. **Technology gets to the root of pipe welding**. Disponível em <www.lincolnelectric.com>. Acesso em: 10/2010a.

LINCOLN. **Surface Tension Transfer® (STT®) – STT Open Root**. Disponível em <www.lincolnelectric.com>. Acesso em: 10/2010b.

LOPES, A. G. T. **Arc-Based sensing in narrow groove pipe welding**. Ph. D. Thesis Cranfield University, 2006.

MACHADO, I. G. Soldagem & Técnicas Conexas: Processos. Porto Alegre, Impresso no Brasil, 477p., 1996.

MAGALHÃES, V. A. N. **Modelo prático para obtenção do controle de um motor de corrente continua com baixo custo**. XXXVII Congresso Nacional de Soldagem (CONSOLDA 2011). Natal-RN, 03 – 06/10/2011.

MARKUS, M. **CMT: The new revolution in digital GMA welding**. Disponível em <www.fronius.com> . Acesso em: 05/2010.

MILLER. **Miller's new, software-driven RMD™ process overcomes short circuit MIG limitations.** Disponível em: http://www.millerwelds.com/about/news_releases/2004_archive/articles82.html. Acesso em: 04/2009.

MILLER. **PipePro® welding system, root-fill-cap welding.** Apr. 2010. Disponível em: http://www.millerwelds.com/pdf/spec_sheets/PWS4-0.pdf. Acesso em: Outubro, 2010.

MODENESI, P.J., **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais**, Apostila Didática, Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, 100p., 2000.

MURAKAWA, H., SANO, M., WANG, J. **Influence of root gap and tach weld on tranverse shrinkage during welding.** Transaction of Joining and Welding Research Institute. Vol. 41, N° 1, pp. 65 – 70. 2012.

MURUGAN, N., PARMAR, R.S. **Effects of MIG process parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel.** Journal of Materials Processing Technology. Vol. 41, pp. 381 – 398,1994.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Data Sheet NI USB-6008, NI USB-6009.** Disponível em: <http://www.ni.com/pdf/products/us/20043762301101dlr.pdf>. Acesso em 10/2010.

NICHOLSON, P. L. **Challenges and solutions for the retention of field production rates in high-strength pipe.** Business Briefing: Exploration & Production: The Oil & Gas Review 2003, Vol. 2. 5p. 2003.

OKUMURA, T., TANIGUCHI, C. **Engenharia de soldagem e aplicações.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 461p. 1982.

OMS. **Bevel Pipe Checker.** OMS – Optical Metrology Services Limited. Disponível em www.omsmeasure.com. Acesso em: 10/2011.

PEREIRA, W. A., FERRARESI, V. A. **Comportamento do cordão na soldagem GMAW pulsada em chanfros estreitos.** Disponível em www.infosolda.com.br/download/15dar.pdf. Acesso em: 08/2009.

PETROMIN PIPELINER. **A New Generation of Welding Systems and Equipment.** Vol. 08. N° 02, pp. 24 – 33. April-June, 2012.

PIPELINE & GAS JOURNAL. **Compact Digitally Controlled Robotic Orbital Automatic Welding System Offered.** Disponível em <www.pipelineandgasjournal.com>. Acesso em 10/2011.

PIRES, I., et al. **Reduction of fume and gas emissions using innovate gas metal arc welding variants.** The International Journal of Advances Manufacturing Technology. Vol. 50, pp. 557 – 567, 2010.

PUMPHREY, T. **Controlling welding fume – A total systems approach.** Welding Innovation, Vol. XV, N° 1, p. 2 – 8, 1998.

RABELLO, C. **O contexto atual da indústria do petróleo no Brasil – O novo marco regulatório: perspectivas, oportunidades e desafios.** TN Petróleo, Ano XIV, N° 85, Set/Out 2012.

RAMPAUL, H. **Pipe welding procedures.** 2a Ed. Industrial Press Inc. Printed in New York, USA. 249p, 2003.

ROSADO, T. M. V. B.: **Inovação do processo MIG/MAG – análise de produtividade e emissão de fumos.** Dissertação de Mestrado – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 81p. 2008.

SCOTTI, A. & PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho.** São Paulo, Artliber Editora, 284p., 2008.

SIEWERT, T., et. al. **On-line monitoring system – An application for monitoring key welding parameters of different welding processes.** Technical Gazette 15 p. 9 – 18, (2008).

SILVA, R. H. G.; DUTRA, J. C.; JÚNIOR, R. G. **Fundamentos científicos e tecnológicos para o desenvolvimento do processo MIG/MAG por curto-circuito controlado (CCC) – Uma revisão da literatura. Parte 2 de 3: Formação da gota metálica, gases de proteção, mecanismos de proteção, aporte térmico e aspectos econômicos.** Soldagem e Inspeção, São Paulo. Vol. 12, N° 4, pp. 326 – 335, Out/Dez. 2007.

SILVA, R. H. G.; DUTRA, J. C.; JÚNIOR, R. G. **Fundamentos científicos e tecnológicos para o desenvolvimento do processo MIG/MAG por curto-circuito controlado (CCC) – Uma revisão da literatura. Parte 3 de 3: Princípio dos sistemas MAG em curto-circuito com controle de corrente.** Soldagem e Inspeção, São Paulo. Vol. 13, N° 1, pp. 70 – 81, Jan/Mar., 2008.

SOUZA, D. **Levantamento de mapas operacionais de transferência metálica para soldagem MIG/MAG de aço ao carbono na posição plana.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG. 2010.

SRINIVASAN, K., BALASUBRAMANIAN, V. **Effect of surface tension transfer on fume formation rate during flux-cored arc welding of HSLA steel.** The International Journal of Advanced Manufacturing. Vol. 56, pp. 125-144. 2011.

STAVA, E. K. **The Surface-Tension-Transfer power source: A new, low-spatter arc welding machine.** Welding Journal, vol. 72, n° 1, pp. 25 – 29, January 1993.

STAVA, E. K. **Technology gets to the root of pipe welding.** Disponível em: <<http://www.lincolnelectric.com/knowledge/articles/content/pipewelding.asp>>, Acesso em: 05/2009.

TBI INDUSTRIES. **MIG/MAG Automáticas.** Disponível em: <[ww.tbi-brasil.com/Produtos/MIG_Classic_AUT_br.pdf](http://www.tbi-brasil.com/Produtos/MIG_Classic_AUT_br.pdf)>. Acesso em 08/2010.

TRI TOOL INC. **Pipeline Equipment.** Disponível em <www.tritool.com>. Acesso em Jan/2010.

TUBENET. **Pipe Industry looks to new processes for mechanized weld quality.** Disponível em <www.tubenet.org.uk/technical/magna.html>. Acesso em: 17/09/2009.

TWI. **What is narrow gap welding?.** Disponível em: <www.twi.co.uk/technical-knowledge/faqs/process-faqs/faq-what-is-narrow-gap-welding/>, Acesso em 10/2010

WEMAN, K. **Welding processes handbook.** Woodhead Publishing Ltd. Cambridge, England. 189p. 2003.

YAPP, D., BLACKMAN, S. A. **Recent Developments in High Productivity Pipeline Welding.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. Vol. XXVI, N° 1, pp. 89-97. January-March 2004.