

**VÍCTOR AUGUSTO NASCIMENTO MAGALHÃES**

**AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM GMAW MECANIZADA E  
AUTOMATIZADA PARA UNIÃO DE DUTOS UTILIZANDO FONTES  
CONVENCIONAL E COM CONTROLE DE CURTO-CIRCUITO**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
2016**

**VÍCTOR AUGUSTO NASCIMENTO MAGALHÃES**

**AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM GMAW MECANIZADA E  
AUTOMATIZADA PARA UNIÃO DE DUTOS UTILIZANDO FONTES  
CONVENCIONAL E COM CONTROLE DE CURTO-CIRCUITO**

**Tese** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Louriel Oliveira Vilarinho

**UBERLÂNDIA - MG**

**2016**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

M188a      Magalhães, Vítor Augusto Nascimento, 1985-  
2016      Avaliação da soldagem GMAW mecanizada e automatizada para  
união de dutos utilizando fontes convencional e com controle de curto-  
circuito / Vítor Augusto Nascimento Magalhães. - 2016.  
219 f. : il.

Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia Mecânica - Teses. 2. Soldagem - Teses. 3. Ângulo -  
Teses. 4. - Teses. I. Vilarinho, Louriel Oliveira, 1975-. II. Universidade  
Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica. III. Título.

CDU: 621

---

*Aos meus pais, Eva e Osmar.*

*Aos meus irmãos, Guilherme e Mayaha Bárbara.*

*À minha noiva, Ana Clara.*



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus;

Ao meu orientador, Louriel Vilarinho, pela orientação, ensinamento e, acima de tudo, pela credibilidade e paciência;

A minha família, o alicerce da minha vida, pelo apoio incondicional, paciência e incentivo;

A minha noiva, Ana Clara, pela compreensão, paciência, pelas contribuições e auxílio na execução deste trabalho;

Ao programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU pela oportunidade;

A CAPES pelo suporte financeiro inicial;

A Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) pelo apoio em conceder uma licença por um ano para a conclusão deste trabalho.

Ao Laprosolda/UFU pelo apoio técnico e laboratorial;

A todos aqueles que me deram suporte para a concretização deste trabalho, como Lucas Alves, Carolina Pimenta, Marcus Vinícius, Diandro, Vinícius Lemes e, em especial aos professores do grupo Laprosolda da UFU e do ICT da UFVJM.

MAGALHÃES, V. A. N. **Avaliação da Soldagem GMAW Mecanizada e Automatizada para União de Dutos Utilizando Fontes Convencional e com Controle De Curto-Circuito.** 2016. 219f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia.

## RESUMO

*O processo mais utilizado para a união de tubos de aço para o transporte de óleo e gás é a soldagem. Embora ainda se utilize a soldagem manual, a soldagem mecanizada e até mesmo a automatizada vem ganhando espaço. Assim, este trabalho contempla a soldagem circunferencial em meia cana de tubos API 5L X65 de 8" de diâmetro nominal e 8,0 mm de espessura, junta de topo com chanfro estreito (abertura de 30°) e preparação em V, por meio de dispositivo de deslocamento (soldagem mecanizada) e com variação de parâmetros (soldagem automatizada). São apresentados os parâmetros de soldagem encontrados para a confecção da junta soldada em dois passes (um de raiz e outro de enchimento/acabamento). Os parâmetros selecionados para o passe de raiz foram retirados de um estudo anterior servindo também como forma de validação de resultados, ora obtidos na soldagem em chapas e, agora em tubos. Foram avaliados os processos GMAW com transferência metálica por curto-circuito em modo convencional e controlado (processos derivativos) utilizando fontes comerciais com diferentes tecnologias (RMD, STT e CMT). Logo após a determinação dos parâmetros de enchimento, foram realizados ensaios mecânicos voltados para sua validação (tração uniaxial, dobramento de face e raiz, nick break, impacto, dureza e macrografia,). Os resultados obtidos para o RMD e CMT foram adequados inicialmente em todos os ensaios e, em um, segundo momento foram também adequados para o STT. Entretanto, os ensaios realizados para processo convencional revelaram a existência de falta de fusão o que levou a necessidade de determinação de novos parâmetros de enchimento. Assim, foi projetado e construído um Sistema de Variação de Parâmetros para Soldagem Circunferencial (SVP) que permite a variação, em função da posição angular (inclinômetro), dos parâmetros mais adequados para cada uma das três posições angulares (plana, vertical e sobrecabeça). Para o processo convencional com variação de parâmetros foi possível obter ganhos em termos de tempo para execução da soldagem da ordem de 38% para a raiz e 30% para o enchimento.*

**Palavras-Chave:** Soldagem Circunferencial; Processo Convencional; Processo Derivativo; API 1104; Inclinômetro.

MAGALHÃES, V. A. N. **Evaluation of GMA Welding Mechanized and Automated for Pipeline Using Conventional and Short Circuit Controlled Power.** 2016. 219f. Doctorate Thesis, Federal University of Uberlândia, MG, Brazil.

## ABSTRACT

*Welding is one of the most employed process for joining steel pipes. Although, manual welding is still the most used one, mechanized version and even automatized one have increased its demand. Thus, this work deals with girth welding of API 5L X65 pipes with 8" of nominal diameter and 8.0 mm thickness, beveled with V-30° narrow gap. Torch is moved by a bug carrier (mechanized welding) and further the parameters are controlled as a function of angular position (automatized welding). Welding parameters are presented for filling the joint with two-passes (root and filling/capping passes). Parameters for the root pass were extracted from previous author's work with weldments carried out in plates, but validated in this work for pipe welding. GMAW processes were assessed with short-circuit metal transfer in both conventional and derivative modes using different technologies (RMD, STT and CMT). After the parameter determination, mechanical testing was performed for welding qualification (uniaxial tension, face and root bending, nick break, Charpy V-notch impact, microhardness and macrograph). The initially obtained results for RMD and CMT were acceptable for all testing and, in a second moment, also for the STT. However, weld beads carried out by using the conventional process failed and revealed the existence of lack of fusion, which required further parametrization. Thus, a Parameter-Variation System for Girth Welding (SVP) was designed and built to allow varying the welding parameters as a function of angular position by using an inclinometer. The parameters were set for each of the three angular positions (flat, vertical downhill and overhead). By using such equipment and approach, the conventional process with parameter variation allowed reducing the welding time for joint accomplishment of the order of 38% for the root pass and 30% for the filling/capping pass.*

**Keywords:** Girth Welding; Conventional Process; Derivative Process; API 1104; Inclinometer.

## LISTA DE SÍMBOLOS

API	<i>American Petroleum Institute</i>
a.t.	Amplitude de tecimento
AWS	<i>American Welding Society</i>
c.d.	Controle dinâmico
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
CP	Corpo de Prova
DBCP	Distância do bico até o contato na peça [mm]
Freq. Tec.	Frequência de tecimento [Hz]
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
I	Corrente [A]
I <sub>b</sub>	Corrente de base [A]
IIW	<i>International Institute of Welding</i>
I <sub>p</sub>	Corrente de pico [A]
Laprosolda	Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem
MIG/MAG	<i>Metal Inert Gas / Metal Active Gas</i>
PFM	Pulse Frequency Modulation
PLa	Parâmetro comprimento do arco
PWM	Pulse Width Modulation
RMD	<i>Regulated Metal Deposition</i>
SSDR	Simulador da Soldagem de Dutos por Retificação
STT	<i>Surface Tension Transfer</i>
SVP	Sistema de Variação de Parâmetros
t <sub>on</sub>	Período da onda quadrada em nível alto
Tout	Tail out
V <sub>A</sub>	Velocidade de alimentação do arame
V <sub>A</sub> ajustada	Velocidade de alimentação ajustada
V <sub>A</sub> desejada	Velocidade de alimentação desejada
V <sub>A</sub> medida	Velocidade de alimentação medida
V <sub>S</sub>	Velocidade de soldagem [cm/s]
V <sub>sold</sub>	Velocidade de soldagem [cm/s]
U	Tensão [Volt]

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Interseção dos parâmetros de soldagem em tubo por posição .....	21
Figura 2. Circuito básico para soldagem GMAW (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012) .....	24
Figura 3. Modos de naturais de transferência metálica (Vilarinho, 2007).....	26
Figura 4. Ilustração esquemática do formato de onda da transferência por curto-circuito. (Adaptado de NORRISH e CUIURI (2013)) .....	28
Figura 5. Imagem correspondente ao formato de onda da Figura 4 (Adaptado de NORRISH e CUIURI (2013)) .....	28
Figura 6. Modos de transferência em função da corrente para eletrodo ER70S-6, 1,2 mm, DBCP de 18 mm e Ar+2%CO <sub>2</sub> (Vilarinho, 2007).....	30
Figura 7. Influência da corrente de base no passe de raiz (BARBOSA, 2011) .....	34
Figura 8. Explicação do formato de onda do processo STT (LINCOLN ELETRIC, 2005) .....	34
Figura 9. Representação esquemática do formato de onda da corrente para o processo RMD (Modificado de Miller, 2004).....	35
Figura 10. Principais fases do processo de transferência CMT (Modificado de COSTA, 2011).....	38
Figura 11. Montagem Esquemática do Processo CMT robotizado. Em detalhe: (A) – “Pulmão ou Compensador de Arame”; (B) – Alimentador dianteiro (MAGALHÃES, 2012).....	39
Figura 12. Posições de Soldagem em tubulações (Adaptado de AWS, 2010). .....	41
Figura 13. Manipuladores para soldagem orbital disponíveis no mercado. (DYNATORQUE, 2014), (POLYSOUDE, 2014), (GULLCO, 2014), (AUTOMATIC WELDING SYSTEMS, 2009), (MAGNATECH, 2014), (CRC-EVANS, 2014) .....	44
Figura 14. Representação das posições de soldagem orbital segundo PIGOZZO (2015).....	46
Figura 15. As quatro posições de soldagem na soldagem orbital segundo LIMA et al. (2005) .....	47
Figura 16. Posições de soldagem simuladas para a soldagem em dutos: I - plana; II - vertical descendente; III – sobrecabeça e IV - vertical ascendente. (MELLER et al., 2014) .....	48

Figura 17. Posições de soldagem para juntas soldadas em tubo. (AWS A3.0, 2010) .....	49
Figura 18. Montagem da junta em chapa (MAGALHÃES, 2012) .....	50
Figura 19. Montagem e detalhamento da junta a ser soldada .....	52
Figura 20. Esquema de montagem e execução das soldagens .....	52
Figura 21. Detalhe do (a) sistema de fixação (“cachorros”) e (b) estreitamento da região oxidada em função da presença deste sistema .....	53
Figura 22. (a) Tubos cortados e chanfrados no torno, prontos à formarem a junta de topo com chanfro em V, (b) junta montada após o processo de limpeza com a lixadeira no torno .....	54
Figura 23. Tubo teste para parâmetros de enchimento.....	54
Figura 24. Bocais utilizados para os passes de (a) enchimento e (b) raiz. ....	55
Figura 25. Vista esquemática do SSDR: P1: suporte da chapa; P2: suporte do trilho; P3: eixo excêntrico; P4: base e P5: acionamento (Magalhães, 2012)....	56
Figura 26. Fontes de soldagem utilizadas (Magalhães, 2012) .....	57
Figura 27. Suporte base para a realização de soldagem circunferencial .....	58
Figura 28. Posição do eixo z do Tartilope (a) na primeira versão, (b) na versão corrigida pelo autor e (c) na última versão do protótipo feita por CARVALHO (2009).....	59
Figura 29. Bancada experimental utilizada para a soldagem de tubos .....	60
Figura 30. Fluxograma da sequência metodológica .....	62
Figura 31. Condições paramétricas para o passe de raiz obtidos a partir do SSDR por MAGALHÃES (2012).....	63
Figura 32. Posições de soldagem e detalhe superficial dos cordões, demonstrando o escorrimento da posição 15 horas e aspecto superficial dos cordões em ambos os passes (E/A – Enchimento/Acabamento e R – Raiz) ...	64
Figura 33. Posição de retirada dos corpos de prova (API1104, 2010) .....	66
Figura 34. Fluxograma do hardware projetado (PIC1 e PIC2) .....	69
Figura 35. Fluxograma do <i>hardware</i> projetado (PIC3) .....	70
Figura 36. Menu auxiliar do cabeçote Alimentador de Arame PipePro Dual DX (adaptado de (MILLER, 2009)).....	72
Figura 37. Painel frontal da fonte PiPePro 450 RFC (adaptado de (MILLER, 2008)).....	73

Figura 38. Soquete Remote 14 da fonte PiPePro 450 RFC (MILLER, 2008) ...	74
Figura 39. Placa de interligação .....	75
Figura 40. Esquema de ligação da placa entre o cabeçote e a fonte.....	76
Figura 41. Cabo de ligação entre o encoder e a placa de processamento do cabeçote e chaves de seleção para controle externo ou pela própria fonte.....	78
Figura 42. Esquema elétrico para sinal de clock externo no Tartílope .....	79
Figura 43. Inclinômetro posicionado no Tartílope.....	80
Figura 44. Circuito esquemático PIC1 (Valim e Ufonte) .....	81
Figura 45. Circuito esquemático do resistor em paralelo na saída do inclinômetro .....	82
Figura 46. Circuito esquemático dos botões de acionamento .....	82
Figura 47. Circuito esquemático da MAX232 para o PIC1 e PIC2 .....	83
Figura 48. Circuito esquemático auxiliar para variação da tensão de soldagem .....	84
Figura 49. Circuito esquemático auxiliar para variação da velocidade de alimentação de arame.....	85
Figura 50. Circuito esquemático do circuito de proteção para ligação do PIC1 no cabeçote.....	86
Figura 51. Circuito esquemático do PIC2 (Vsold).....	88
Figura 52. Relê acionado pelo gatilho .....	89
Figura 53. Encoder adaptado no cabeçote para medição de velocidade de alimentação .....	90
Figura 54. Circuito esquemático de leitura da velocidade de alimentação (PIC3) .....	91
Figura 55. Circuito esquemático de proteção da comunicação serial .....	92
Figura 56. Circuito esquemático do “seguidor de tensão pré-regulado”.....	93
Figura 57. Layout da placa de circuito impresso do SVP .....	94
Figura 58. Vista externa do SVP .....	95
Figura 59. Pinagem dos cabos externo ao SVP .....	97
Figura 60. Vista interna do SVP .....	98

Figura 61. Relação entre o <i>duty</i> e a tensão de soldagem .....	102
Figura 62. Relação entre PR2 e a velocidade de soldagem angular.....	107
Figura 63. Relação entre a frequência do encoder e a velocidade de alimentação de arame .....	109
Figura 64. Tela do PICbootPlus.exe.....	111
Figura 65. Fluxograma do programa inserido no PIC1 e PIC2.....	112
Figura 66. Tela de inicialização do SVP .....	114
Figura 67. Tela de visualização dos parâmetros .....	114
Figura 68. Tela de posição inicial do Tartilope .....	115
Figura 69. Tela aguardando disparo .....	115
Figura 70. Interface do RComSerial para leitura da velocidade de alimentação de arame .....	117
Figura 71. Oscilograma do passe de raiz do teste Raiz_conv_4.....	121
Figura 72. Oscilograma do passe de raiz do teste Raiz_STT_1 .....	122
Figura 73. Oscilograma do passe de raiz do teste Raiz_RMD_1 .....	123
Figura 74. Oscilograma do passe de raiz do teste Raiz_CMT_1 .....	124
Figura 75. Oscilograma do passe de enchimento do teste Enchi_conv_9 .....	127
Figura 76. Oscilograma do passe de enchimento do teste Enchi_STT_5.....	129
Figura 77. Oscilograma do passe de enchimento do teste Enchi_RMD_3 ....	131
Figura 78. Oscilograma do passe de enchimento do teste Enchi_CMT_4.....	133
Figura 79. Ensaio macrográfico dos cordões obtidos sem variação de parâmetros (considerar a espessura da chapa de 8 mm) .....	134
Figura 80. Valores de dureza obtidos para a raiz (a) e enchimento (b).....	138
Figura 81. Curvas tensão-deformação para os ensaios de tração uniaxial....	141
Figura 82. Aspectos visuais dos CP's de tração e de suas fraturas.....	142
Figura 83. Aspectos visuais dos CP's de tração e de suas fraturas para o metal de base .....	143
Figura 84. CP's após ensaios de dobramento, com indicações de trincamento. .....	144



Figura 85. CP's após ensaio <i>Nick Break</i> .....	145
Figura 86. Detalhe dos corpos de prova para ensaio de impacto Charpy com base nas normas API 1104:2010 (esquerda) e ISO 15653:2010 (direita), e exemplo CP (inferior) .....	146
Figura 87. Energia absorvida em função do processo no quadrante superior (SUP) e inferior (INF) .....	148
Figura 88. Detalhe das fraturas dos CP's do ensaio Charpy, com menor deformação (lado esquerdo) e maior deformação (lado direito): a e b: espessura 5,0 mm; c, d, e, f :espessura 6,4 mm.....	149
Figura 89. Oscilograma de tensão e corrente do teste Plana_9_raiz.....	152
Figura 90. Faixa angular “soldável” para cada conjunto de parâmetros (verde – parâmetros da plana; azul – parâmetros da vertical; amarelo – parâmetros da sobrecabeça).....	157
Figura 91. Ângulos de transição encontrados para o passe de raiz utilizando-se o SVP .....	160
Figura 92. Gráficos do teste SVP_5_raiz .....	161
Figura 93. Gráfico comparativo entre o tempo gasto pelo SVP e pelo processo sem variação para soldagem do passe de raiz em tubo .....	164
Figura 94. Macrografia do passe de raiz realizado com o SVP utilizando-se os parâmetros do teste SVP_5_raiz (considerar a espessura da chapa igual a 8,0 mm) .....	165
Figura 95. Medidas para cálculo do volume do enchimento com base na raiz realizada pelo SVP utilizando-se os parâmetros do teste SVP_5_raiz .....	166
Figura 96. Detalhes do “chanfro simulado” (a) e do perfil do cordão de enchimento conforme API 1104 (b).....	167
Figura 97. Efeito da concavidade da face do cordão de enchimento .....	171
Figura 98. Ângulos de transição encontrados para o passe de enchimento utilizando-se o SVP .....	173
Figura 99. Gráficos do teste SVP_8_enchi .....	175
Figura 100. Gráfico comparativo entre o tempo gasto pelo SVP e pelo processo sem variação de parâmetros para a soldagem do passe de enchimento em tubo .....	177
Figura 101. Macrografia da primeira solda realizada com o SVP utilizando-se os parâmetros SVP_5_raiz e SVP_9_enchi (considerar a espessura da chapa igual a 8,0 mm).....	179

Figura 102. Macrografia da segunda solda realizada com o SVP utilizando-se os parâmetros SVP\_5\_raiz e SVP\_9\_enchi (considerar a espessura da chapa igual a 8,0 mm)..... 180

Figura 103. Macrografia da segunda solda realizada com o SVP utilizando-se os parâmetros SVP\_5\_raiz e SVP\_6\_enchi (considerar a espessura da chapa igual a 8,0 mm)..... 182

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Requisitos químicos para o aço API 5L X65 (API 5L, 2012) .....	51
Tabela 2. Composição química do metal de base utilizado .....	51
Tabela 3. Parâmetros de soldagem para o passe de raiz em tubos .....	63
Tabela 4. Parâmetros ajustados para o passe de enchimento/acabamento ....	65
Tabela 5. Ensaios mecânicos executados e suas respectivas quantidades e localizações.....	66
Tabela 6. Relação entre o <i>duty</i> do PWM e a tensão de soldagem.....	101
Tabela 7. Tabela de calibração da velocidade de soldagem.....	106
Tabela 8. Tabela de calibração do encoder de leitura da velocidade de alimentação .....	108
Tabela 9. Parâmetros utilizados para passe de raiz (convencional) .....	120
Tabela 10. Parâmetro utilizado para passe de raiz (STT) .....	121
Tabela 11. Parâmetro utilizado para passe de raiz (RMD).....	122
Tabela 12. Parâmetro utilizado para passe de raiz (CMT) .....	124
Tabela 13. Parâmetros utilizados para passe de enchimento (Convencional) .....	126
Tabela 14. Parâmetros utilizados para passe de enchimento (STT) .....	129
Tabela 15. Parâmetros utilizados para passe de enchimento (RMD) .....	130
Tabela 16. Parâmetros utilizados para passe de enchimento (CMT).....	132
Tabela 17. Tabela resumo para soldagem sem variação de parâmetros.....	133
Tabela 18. Parâmetros adequados para enchimento com o STT obtido por Nascimento (2015).....	136
Tabela 19. Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração.....	139
Tabela 20. Resultados dos ensaios de tração.....	139
Tabela 21. Requisitos mínimos do teste de tração. (Adaptado da API 5L, 2012) .....	140
Tabela 22. Resultados do ensaio de impacto Charpy .....	148

Tabela 23. Parâmetros regulados em chapa para soldagem na posição plana. .....	151
Tabela 24. Parâmetros regulados em chapa para soldagem na posição vertical .....	153
Tabela 25. Parâmetros regulados em chapa para soldagem na posição Sobrecabeça. ....	154
Tabela 26. Resumo dos parâmetros obtidos em chapa para cada uma das três posições .....	155
Tabela 27. Condições paramétricas para soldagem do passe de raiz com o SVP .....	158
Tabela 28. Tabela de velocidade/tempo para cada posição angular .....	162
Tabela 29. Tabela de parâmetros dos testes de enchimento com o SVP .....	169
Tabela 30. Condições paramétricas finais para soldagem do passe de enchimento com o SVP .....	174

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>22</b>
<b>3.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>23</b>
<b>3.1.</b>	<b>Processo de soldagem GMAW.....</b>	<b>23</b>
3.1.1.	Modos de transferência natural.....	25
3.1.1.1.	Transferência por curto-circuito.....	27
3.1.1.2.	Transferência globular.....	29
3.1.1.3.	Transferência goticular ( <i>spray</i> ).....	29
3.1.1.4.	Transferência por explosão .....	30
3.1.2.	Modos de transferência controlados .....	31
3.1.2.1.	Processo STT.....	33
3.1.2.2.	Processo RMD.....	35
3.1.2.3.	Processo CMT .....	37
<b>3.2.</b>	<b>Soldagem orbital.....</b>	<b>40</b>
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>50</b>
<b>4.1.</b>	<b>Materiais.....</b>	<b>50</b>
<b>4.2.</b>	<b>Equipamentos .....</b>	<b>56</b>
<b>4.3.</b>	<b>Instrumentação .....</b>	<b>60</b>
<b>4.4.</b>	<b>Sequência metodológica .....</b>	<b>61</b>
<b>5.</b>	<b>SISTEMA DE VARIAÇÃO DE PARÂMETROS PARA SOLDAGEM CIRCUNFERENCIAL (SVP).....</b>	<b>69</b>
<b>5.1.</b>	<b>Alterações para controle externo na fonte da Miller.....</b>	<b>71</b>
<b>5.2.</b>	<b>Alterações para controle externo do Tartilope .....</b>	<b>79</b>
<b>5.3.</b>	<b>Sensor de inclinação .....</b>	<b>79</b>
<b>5.4.</b>	<b>Sistema para variar a Tensão de soldagem/velocidade de alimentação (PIC1) .....</b>	<b>81</b>
<b>5.5.</b>	<b>Sistema para variar velocidade de soldagem (PIC2).....</b>	<b>87</b>
<b>5.6.</b>	<b>Sistema para leitura da velocidade de alimentação (PIC3) .....</b>	<b>90</b>
<b>5.7.</b>	<b>Sistema de isolamento das portas de comunicação serial .....</b>	<b>91</b>
<b>5.8.</b>	<b>Sistema de alimentação para as placas .....</b>	<b>92</b>

<b>5.9.</b>	<b>Layout da placa de circuito impresso do SVP .....</b>	<b>94</b>
<b>5.10.</b>	<b>Sistema SVP depois de montado.....</b>	<b>95</b>
<b>5.11.</b>	<b>Levantamento das curvas de calibração dos circuitos. ....</b>	<b>98</b>
5.11.1.	Calibração do sinal do inclinômetro.....	99
5.11.2.	Calibração do sinal de controle da tensão .....	99
5.11.3.	Calibração do sinal de controle da velocidade de alimentação.....	102
5.11.4.	Calibração do sinal de controle da velocidade de soldagem.....	103
5.11.5.	Calibração do encoder que mede a velocidade de alimentação .....	108
<b>5.12.</b>	<b>Programas em linguagem C inseridos nos PIC.....</b>	<b>109</b>
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>118</b>
<b>6.1.</b>	<b>Realização das soldagens em tubo dos parâmetros obtidos com o SSDR (raiz) .....</b>	<b>118</b>
6.1.1.	Passe de raiz para o processo convencional.....	119
6.1.2.	Passe de raiz para o processo STT .....	121
6.1.3.	Passe de raiz para o processo RMD .....	122
6.1.4.	Passe de raiz para o processo CMT.....	123
<b>6.2.</b>	<b>Determinação dos parâmetros para o passe de enchimento.....</b>	<b>125</b>
6.2.1.	Passe de enchimento para o processo convencional.....	126
6.2.2.	Passe de enchimento para o processo STT .....	128
6.2.3.	Passe de enchimento para o processo RMD .....	130
6.2.4.	Passe de enchimento para o processo CMT .....	131
<b>6.3.</b>	<b>Resultado dos Ensaios Mecânicos e Macrografias .....</b>	<b>133</b>
<b>6.4.</b>	<b>Levantamento de parâmetros para passe de raiz para utilização no SVP .....</b>	<b>149</b>
6.4.1.	Posição plana .....	149
6.4.2.	Posição vertical.....	152
6.4.3.	Posição Sobrecabeça .....	153
<b>6.5.</b>	<b>Validação com o SVP dos parâmetros obtidos nas três posições de soldagem.....</b>	<b>155</b>
<b>6.6.</b>	<b>Levantamento de parâmetros para o passe de enchimento .....</b>	<b>166</b>
<b>6.7.</b>	<b>Avaliação final do cordão de solda obtido com o SVP .....</b>	<b>177</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>183</b>
<b>8.</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>186</b>
<b>9.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>187</b>

<b>10.</b>	<b>APÊNDICE I: PSEUDO-CÓDIGO DOS PROGRAMAS DO PIC1 E PIC2 .....</b>	<b>194</b>
<b>11.</b>	<b>APÊNDICE II: PROGRAMA GRAVADO NO PIC1 .....</b>	<b>202</b>
<b>12.</b>	<b>APÊNDICE III: PROGRAMA INSERIDO NO PIC2.....</b>	<b>209</b>
<b>13.</b>	<b>APÊNDICE IV: PROGRAMA INSERIDO NO PIC3.....</b>	<b>215</b>
<b>14.</b>	<b>APÊNDICE V: LISTAGEM DOS COMPONENTES ELETRÔNICOS UTILIZADOS .....</b>	<b>217</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Na abertura da Rio Pipeline Conference & Exposition 2013, o presidente do Instituto de Logística e Supply Chain (Ilos), Paulo Fleury, afirmou que com uma malha de menos de 30 mil quilômetros de dutos e gasodutos e uma taxa média de crescimento de apenas 2% por ano, o Brasil ainda tem um enorme potencial de expansão desse setor. Mas terá de investir pesado na qualificação e na retenção de mão de obra, bem como para aumentar a produtividade e a eficiência logística para não deixar que essa oportunidade se torne uma situação de risco. Este ainda afirma que a malha dutoviária brasileira, composta em 2013 por 19,7 mil km de dutos, cresceu em média 2% ao ano desde 2000, quando havia 15,1 mil km de linhas. Segundo o especialista, o crescimento absoluto da malha desde 2005 foi da ordem de 30%, o maior registrado entre os modais (MIGUEZ, 2013; RODRIGUES, 2013).

No ano de 2013 (ainda no início deste trabalho), os planos para o setor de óleo e gás no Brasil eram muito otimistas. Havia estimativas de investimentos no desenvolvimento pleno do pré-sal na ordem de US\$ 700 bilhões. Especialistas acreditavam que 20% desse volume seriam direcionados à soldagem, exigindo cada vez mais tecnologia (CIMM, 2013).

No entanto, apesar da crescente necessidade expansão da malha dutoviária, a Petrobrás que é a principal investidora no mercado do petróleo no Brasil está passando desde 2014 pela maior crise desde sua fundação. Os cortes nos investimentos da companhia para os próximos anos 2015-2019 chegam a US\$ 32 bilhões (PORTALG1, 2015; ORDOÑEZ, 2016).

Sendo assim, em virtude da necessidade de se continuar produzindo, mas com redução de custos, aumenta-se a necessidade por soluções que além de enfatizar a diminuição de custos, promova a produção.

A necessidade e importância da expansão da malha dutoviária é inegável. Entretanto, um ponto não pode passar despercebido que é o fato que para a formação de um duto é necessário a união de diversos tubos. O processo de união mais utilizado para união de tubos de aço para transporte de óleo e gás é a soldagem (DOMINGUES, 2004).

Tomando-se como base o gasoduto Paulínia-Jacutinga que percorre 93 km e liga a cidade paulista à mineira Jacutinga e considerando-se que geralmente os tubos são



fornecidos com comprimento de 12 metros, foram necessários nesta obra o efetivo de 7750 tubos. (PETROBRÁS, 2014). Neste ponto, também se torna necessária a operação de soldagem para a união dos 7750 tubos. Mesmo sem levar em conta a preparação para a soldagem, tipo de junta, quantidade de passes, processo, velocidade de soldagem, etc., torna-se evidente a necessidade de processos e técnicas de soldagem que permitam uma produção mais rápida e a um custo competitivo.

Na constante busca por redução de custo e maior produtividade, diferentes construtores têm optado por processos de soldagem semiautomáticos. Por décadas, as maiores empreiteiras especializadas na construção de tubulações no âmbito mundial adotaram sistemas automáticos de soldagem, tendo sido sua opção imediatamente recompensada. As principais razões para a mudança são: aumento de produtividade, menores custos da soldagem, melhor aproveitamento da mão de obra, treinamento de operadores (soldadores) em poucas semanas, menor percentual de reparos, reprodutibilidade perfeita de uma junta de teste (FORTES; DOMINGUES, 2004).

Dentre os processos semiautomáticos de soldagem, o GMAW é o de maior expressão para a união de dutos em campo. Apesar dos bons resultados com o processo em seu modo convencional, existem também variantes desse processo principal que fazem o controle eletrônico<sup>1</sup>/mecânico<sup>2</sup> da transferência metálica de arame para a poça aumentando ainda mais a capacidade operacional. Tais variantes são denominadas de processos derivativos.

No entanto, a maior dificuldade da soldagem de tubos em campo (posição 5G) é a variação da posição de soldagem ao longo do processo. A solda que geralmente se inicia na posição plana, à medida que caminha ao longo do tubo, passa pela posição vertical até que fique de cabeça para baixo (posição sobrecabeça). Apesar dos ganhos obtidos com a adoção do processo GMAW convencional ou seus derivativos, a adoção de um único conjunto de parâmetros (regulagem da máquina e do sistema de movimentação) para a soldagem de meia cana (metade do tubo) é uma das maiores dificuldades encontradas (MAGALHÃES, 2012; VARGAS, 2013).

Na Figura 1, percebe-se que para soldagem com um único conjunto de parâmetros, este deve atender as exigências da posição plana, vertical e sobrecabeça.

---

<sup>1</sup> Exemplo: fontes da Miller (com a tecnologia RMD - *Regulated Metal Deposition*) e da Lincoln (com a tecnologia STT - *Surface Tension Transfer*).

<sup>2</sup> Fonte da Fronius com a tecnologia CMT – *Cold Metal Transfer*.

Consequentemente, a faixa operacional do processo diminui e não se pode explorar toda a potencialidade do processo de soldagem, sendo uma condição muito difícil de ser encontrada. Isto implica no aumento do tempo e custo do processo como um todo.

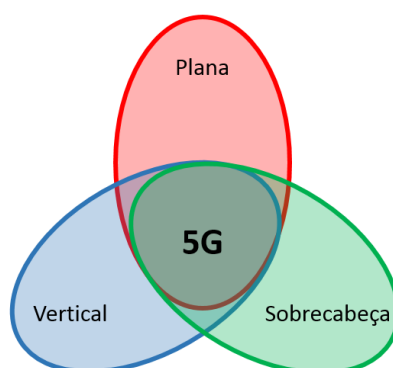


Figura 1. Interseção dos parâmetros de soldagem em tubo por posição

Não obstante, o principal objetivo da soldagem orbital mecanizada é soldar tão rápido quanto se possa enquanto a qualidade da solda permaneça constante. Apesar desta velocidade depender da espessura do material, por exemplo, ela depende também da posição angular em que se está soldando (HEINZMAN, 1999; FAES et al., 2009).

Pelos motivos apresentados e diante da necessidade do atual cenário econômico, de se produzir mais a um custo menor, o intuito deste trabalho é fazer uma avaliação da soldagem GMAW (convencional e derivativos) mecanizada e automatizada (com variação de parâmetros) para união de dutos da indústria do petróleo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1.Objetivo geral**

Desenvolver técnicas e procedimentos para a execução de soldagem GMAW mecanizada e automatizada passível de ser executada em dutos na fabricação soldada com maior produtividade economizando tempo.

### **2.2.Objetivos específicos**

- Validar o envelope operacional já levantado em trabalhos anteriores<sup>3</sup> para o passe de raiz com o processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito nas versões convencional e derivativa por meio das tecnologias CMT, RMD e STT;
- Estabelecer condições paramétricas para execução do passe de enchimento sobre as raízes validadas na soldagem em progressão descendente na posição 5G;
- Realizar ensaios mecânicos e macrografia para avaliação da integridade das soldas;
- Desenvolver um sistema para monitoramento da posição de soldagem ao longo da progressão descendente (plana – vertical descendente – sobrecabeça), que seja capaz de alterar os parâmetros de forma automática junto à fonte de soldagem e ao sistema de movimentação, executando, assim, uma soldagem automatizada;
- Levantar parâmetros para os passes de raiz/enchimento para soldagem com o sistema de variação de parâmetros; e
- Validar o sistema de variação de parâmetros.

---

<sup>3</sup> Magalhães (2012) levantou um envelope operacional para soldagem de passe de raiz a partir de um simulador para soldagem de dutos por retificação.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este trabalho aborda o estudo da soldagem de dutos pelo processo GMAW utilizando fontes com controle de curto-circuito. Neste sentido é fundamental uma base sólida para compreender os processos e a metodologia que serão aqui abordados. Nesta revisão serão descritos os princípios fundamentais da soldagem associados aos processos de soldagem GMAW curto-circuito convencional e controlado.

Além do processo de soldagem em si, este trabalho aborda uma parte de desenvolvimento eletrônico para fazer o controle da fonte de soldagem e do sistema de movimentação da tocha. Portanto, nesta revisão também serão abordados tópicos que sirvam de embasamento teórico acerca do assunto.

#### 3.1. Processo de soldagem GMAW

O processo GMAW é um dos mais utilizados para a soldagem de metais na indústria, tanto de forma manual como mecanizada. Este processo entrou no mercado como forma de aumentar a produtividade, qualidade e integridade da junta soldada (LI, 2007; TORBATI, 2011). Por também utilizar gás inerte, o processo GMAW pode ser tão limpo como GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) com taxa de deposição mais elevada que permite que a velocidade de soldagem seja maior em materiais de espessuras elevadas. A soldagem é possível de ser executada por soldadores de perícia média, embora o tamanho da tocha possa dificultar a soldagem de cantos e pequenas áreas (STAVA, 2001; KOU, 2003; VEL MURUGAN; GUNARAJ, 2005).

O equipamento básico para a soldagem GMAW é composto por uma fonte de energia, um alimentador de arame, uma tocha de soldagem e uma fonte de gás protetor, além de cabos e mangueiras com reguladores de pressão (Figura 2). Dispositivos auxiliares como posicionadores e sistemas de movimentação da tocha podem ser usados na soldagem mecanizada.

O processo GMAW é amplamente utilizado em fabricação nas indústrias devido a suas vantagens inerentes. Vantagens como elevada taxa de deposição de metal, grande penetração na raiz, transferência suave o que leva a uma poça estável, baixa quantidade de respingos e facilidade de automação com uma melhor qualidade de solda a um custo competitivo com os outros processos de soldagem (PAL; PAL, 2011).

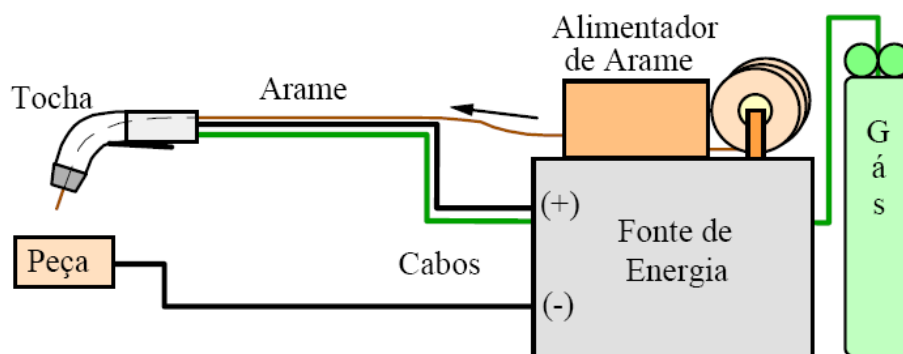


Figura 2. Circuito básico para soldagem GMAW (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012)

O arame é alimentado para o arco através de um alimentador de arame automático que desenrola o arame de uma bobina com geralmente 15 kg. Com isso, consegue-se fazer uma solda contínua ao longo de um tubo, por exemplo, diferentemente do que se consegue com o processo por eletrodo revestido. O arco é protegido de contaminantes na atmosfera através do fluxo de gases como  $\text{CO}_2$ , argônio, hélio, etc, e é por isso que este processo principalmente na Europa é conhecido como *Metal Inert Gas* (MIG) ou *Metal Active Gas* (MAG) (KOU, 2003). Como esta denominação somente difere o nome em função do gás, se utilizará neste trabalho o termo GMAW por se considerar mais apropriado.

As principais variáveis no processo GMAW (convencional e derivativos) soldado a partir de uma fonte de tensão constante são tensão do arco e velocidade de alimentação de arame. Outras variáveis, tais como a inclinação da tocha, a DBCP (distância do bico de contato até a peça), vazão do gás, diâmetro e composição do arame, além das características do chanfro são também importantes. A energia de soldagem, definida como sendo a energia liberada pela fonte de calor por unidade de comprimento da solda, é afetada pelos parâmetros principais além da velocidade de soldagem de acordo com a Equação (1) (PAL; PAL, 2011; MODENESI, 2014).

$$E = \frac{1}{V_{\text{sold}} T} \int_0^T UI \, dT \quad (1)$$

Onde nesta equação, “E” representa a energia do arco (J/cm), “T” a corrente (Ampere), “U” a tensão (Volt) e por fim  $V_{\text{sold}}$  a velocidade de soldagem (cm/s).

Uma das principais vantagens deste processo consiste no fato de que o modo de transferência de metal fundido a partir do eletrodo consumível pode ser

intencionalmente alterado e controlado através de uma combinação de composição de gás de proteção, tipo de fonte de alimentação, tipo de eletrodo e parâmetros tais como, tensão e velocidade de alimentação do arame (que resulta na corrente desejada).

Existem dois tipos fundamentais de transferência metálica no processo GMAW: natural e controlado. Os modos naturais ainda se subdividem em transferência por curto-circuito e por voo livre. No primeiro, há o contato da gota com a poça antes de seu destacamento enquanto que no segundo a gota se destaca antes de tocar a poça.

Os modos naturais de transferência metálica de uma forma geral apresentam limitações quando se requer a otimização de características operacionais (por exemplo, soldar chapas finas ou fora da posição plana sem grande incidência de respingos). Estas demandas datam do início do processo GMAW, mas a solução só foi possível com o advento de equipamentos mais modernos, que passaram a permitir controlar a transferência metálica. Assim surgiram os chamados modos controlados de transferência metálica, que são nada mais do que os modos naturais obtidos de uma forma proposital e dominada, seja através da programação de alterações de parâmetros ou de auto regulação via monitoramento de uma das variáveis. (PONOMAREV, 2008)

A Figura 3 representa os modos naturais de transferência de acordo com a classificação do IIW (VILARINHO, 2007).

### **3.1.1. Modos de transferência natural**

Dentro da temática deste trabalho, serão abordados tanto a transferência natural quanto controlada. Para melhor compreensão deste último, é imprescindível saber primeiramente como funcionam os modos naturais de transferência da gota metálica. Neste sentido, a seguir serão brevemente apresentadas as diversas subdivisões do modo natural.

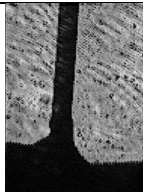
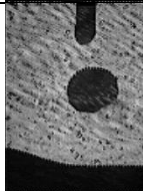
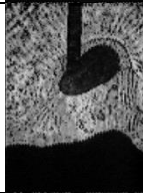
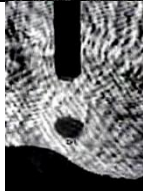


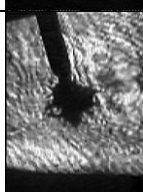

Proposta de classificação pelo IIW			Tipo fundamental	Figura
Fundamental		Variante		
A	Curto-circuito	Curto-circuito	Natural	
		Curto-circuito controlado	Controlado	
B	Globular	Globular em gotas	Natural	
		Globular repelida	Natural	
C	Pulsada projetada	Pulsada	Controlado	
D	Goticular (spray)	Goticular	Natural	
		Elongamento (streaming)	Natural	
		Explosiva	Natural	
E	Rotacional	Rotacional	Natural	

Figura 3. Modos de naturais de transferência metálica (Vilarinho, 2007)

### 3.1.1.1. Transferência por curto-circuito

A transferência por curto-circuito ocorre geralmente com baixos níveis de tensão e corrente o que implica em uma baixa força eletromagnética permitindo que a gota toque a poça antes mesmo que seja destacada. Inicialmente como a corrente é baixa, o Efeito *Pinch*<sup>4</sup> é pouco expressivo. No entanto, durante o curto-circuito a corrente cresce e passa a ser considerável e assim o Efeito *Pinch* também se torna mais considerável e acaba por ajudar a tensão superficial no papel de destacamento da gota para a poça de fusão.

Pela Figura 4 e Figura 5 percebe-se que no momento do curto-circuito a tensão diminui e a corrente eleva-se. A taxa de elevação da corrente é dependente da indutância: para alta indutância a corrente sobe lentamente e a ponta do arame pode acabar se afundando na poça e proporcionando um apagamento momentâneo do arco; em contrapartida, uma baixa indutância determina uma alta taxa de elevação da corrente o que implica em uma forte influência do Efeito *Pinch* com consequências de destacamento abrupto da gota resultando em muitos respingos. Assim, a taxa de subida da corrente de curto-circuito deve ser alta o suficiente para proporcionar a transferência da gota, mas baixa o suficiente para minimizar a geração de respingos (PONOMAREV, 2008).

Dado ao baixo aporte térmico deste tipo de transferência, visto que a corrente e a tensão na fase de arco aberto são relativamente baixas em comparação a outros tipos de transferência, além do fato de que, no momento do curto-circuito, o arco se apaga, o calor transferido para a peça é pequeno. Isto favorece a soldagem de chapas finas além da capacidade de soldar fora da posição plana. Na soldagem circunferencial de passe de raiz em tubos, utiliza-se muito este modo de transferência (COSTA, 2011; MAGALHÃES, 2012; VARGAS, 2013; NASCIMENTO, 2015).

---

<sup>4</sup> Efeito de estrangulamento da gota devido a ação de forças eletromagnéticas (LUZ; RODRIGUES; FERRARESI, 2004).



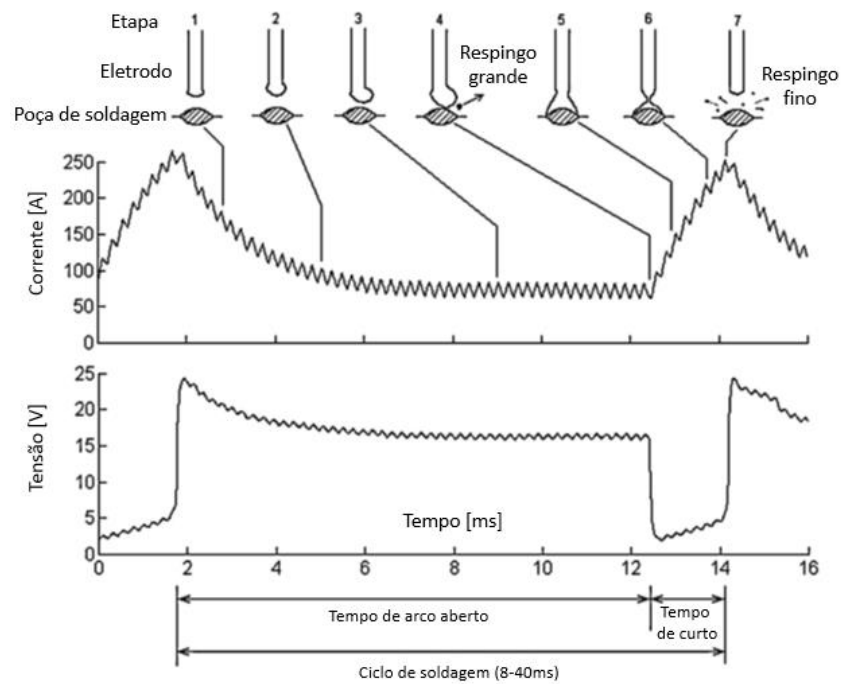


Figura 4. Ilustração esquemática do formato de onda da transferência por curto-circuito. (Adaptado de NORRISH e CUIURI (2013))

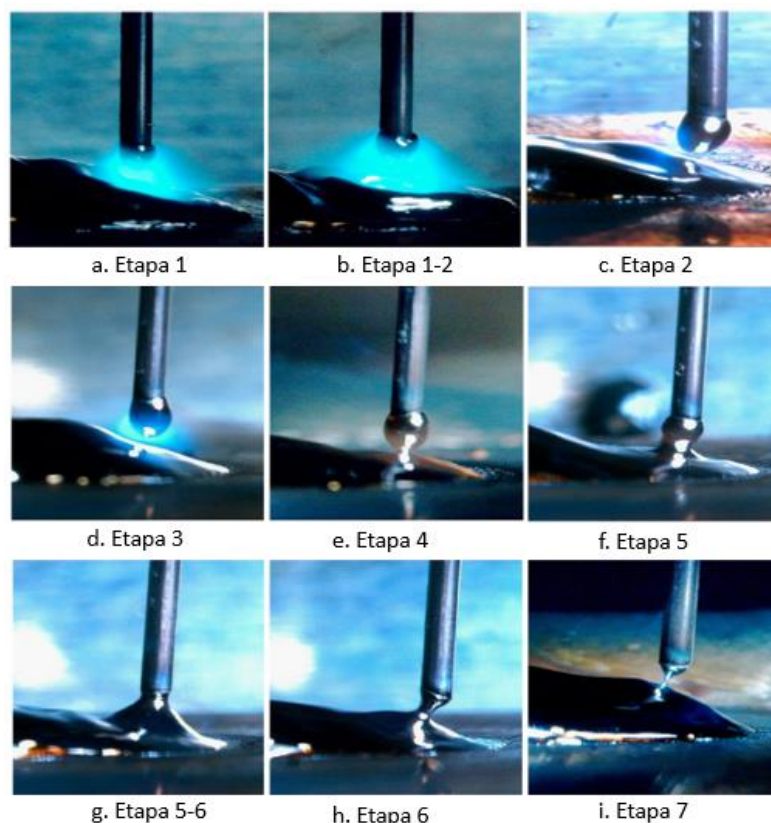


Figura 5. Imagem correspondente ao formato de onda da Figura 4 (Adaptado de NORRISH e CUIURI (2013))

### 3.1.1.2. Transferência globular

A transferência globular ocorre normalmente a baixas correntes e altas tensões do arco (ou seja, arcos longos), sendo caracterizada por grandes gotas irregulares e aleatórias acompanhadas de baixa taxa de transferência. Devido à baixa corrente, este modo de transferência não possui boa capacidade de produção, como também baixa penetração. Como as gotas formadas são grandes, a força predominante no seu destacamento é a gravitacional que ao superar a força devido à tensão superficial impulsiona a gota contra a poça.

Neste tipo de transferência, a soldagem é limitada a posição plana pelo fato do arco ser longo e a gota maior e mais pesada. Fora da posição plana as gotas podem se destacar sem acompanhar o arco. Isto colabora para a grande quantidade de respingos gerada. O aspecto irregular, a grande quantidade de respingos e a baixa penetração limitam este tipo de transferência em aplicações práticas.

### 3.1.1.3. Transferência goticular (*spray*)

Com um acréscimo de corrente em relação a transferência globular, atinge-se a transferência goticular (*spray*). Procura-se manter o mesmo comprimento do arco, ou seja, a manutenção dos mesmos níveis de tensão. Com esse novo patamar de corrente, as gotas passam de grande em baixa frequência para pequenas em alta frequência (acima de 200 gotas por segundo) com diâmetro próximo ao diâmetro do eletrodo.

A corrente acima da qual o tipo de transferência deixa de ser globular e passa a ser goticular é denominada corrente de transição. Diferentes fatores governam essa corrente, como o tipo do arame, o seu diâmetro e o gás de proteção usado. Para um arame eletrodo C-Mn de 1,0 mm com 80% de Ar e 20 % de CO<sub>2</sub>, por exemplo, uma corrente de transição em torno de 200 A é encontrada (NORRISH, 1992).

Na transferência goticular, a força predominante é a eletromagnética uma vez que a corrente encontra patamares mais elevados que no modo curto-circuito e globular, por exemplo. A Figura 6 ilustra a mudança do modo de transferência em função do valor da corrente.

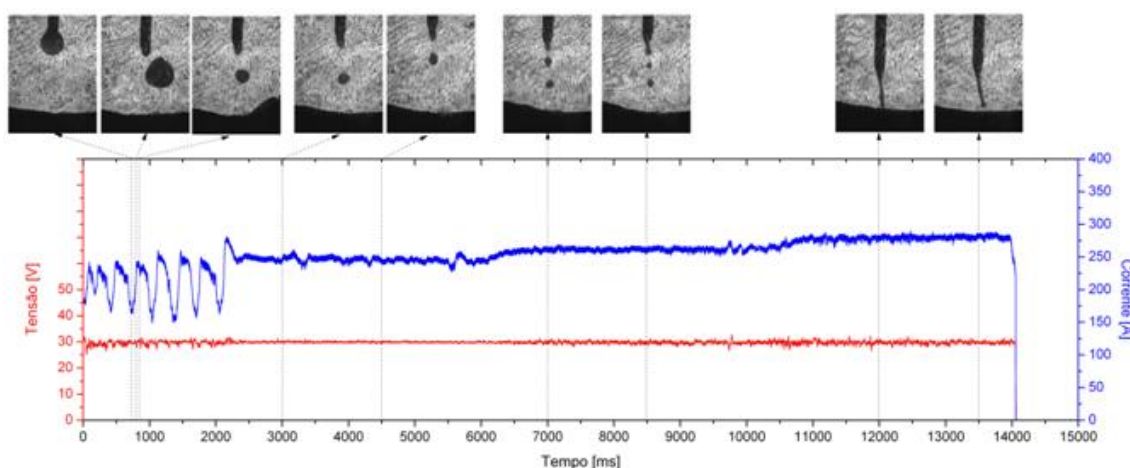


Figura 6. Modos de transferência em função da corrente para eletrodo ER70S-6, 1,2 mm, DBCP de 18 mm e Ar+2%CO<sub>2</sub> (Vilarinho, 2007)

Dentre as principais características da transferência goticular pode-se destacar: a elevada estabilidade do arco, praticamente não gera respingos, boa molhabilidade e boa penetração, proporcionar cordões com bom aspecto visual, favorecer a soldagem em alta velocidade além de apresentar alta taxa de deposição. Embora não permita soldar chapas finas e fora da posição plana, devido ao grande volume da poça de fusão e a alta penetração, a transferência goticular é muito desejada.

Com um aumento da corrente e a manutenção do comprimento do arco na transferência goticular ocorre a formação de um cone na ponta do eletrodo e gotas com diâmetros menores que o diâmetro do eletrodo, o que caracteriza a transferência com alongamento (*streaming*). Este tipo de transferência é regular e estável e devido ao alto calor imposto é indicada para alta produção, sendo limitada também à soldagem na posição plana. Com um aumento ainda maior na corrente, atinge-se a transferência rotacional, onde a ponta do eletrodo serve como um pivô para que o filamento líquido em transferência execute um movimento rotacional-espiral e/ou em forma de cone. As gotas possuem um diâmetro muito menor que o eletrodo, com elevada frequência (acima de 600 Hz) e a transferência se torna um pouco instável (VILARINHO, 2007).

#### 3.1.1.4. Transferência por explosão

A transferência explosiva ocorre devido a formação de gases/vapores por reações químicas e/ou mudança fase de elementos presentes no arame e que se acumulam no interior das gotas ainda em formação. Com isso, antes do destacamento da

gota ela explode causando muitos fumos e respingos finos. Geralmente ocorre na soldagem com arames compostos por ligas de alumínio com magnésio devido a sua vaporização.

### 3.1.2. Modos de transferência controlados

A tendência atual em soldagem tem sido a utilização de novos sistemas de controle de formato de onda, além do fato de que as fontes de alimentação podem gerar mais exatidão e precisão com melhoria substancial no controle do arco. Na verdade, a nova geração de fontes de alimentação fornece um controle mais preciso da transferência de metal com grandes benefícios para a estabilidade do arco. Para atender a necessidade de soldagem fora da posição plana, soldagem de chapas finas, e melhor estabilidade de arco sem muitos respingos, surgiram os modos controlados de transferência. Entende-se aqui este “controle” como o domínio do sinal de corrente, de uma forma cíclica, visando à otimização das características favoráveis de cada transferência para atingir condições de soldagem mais adequadas para situações especiais (PONOMAREV, 2008).

Para o setor de dutos offshore, por exemplo, a soldagem do passe de raiz em tubulações com chanfro estreito é muito significante, tanto em termos de requisitos de qualidade como produtividade. Pelo fato do passe de raiz ser em geral o mais lento, ele controla a taxa na qual o tubo pode ser deslocado até a próxima seção de solda para enchimento. Daí a velocidade de soldagem do passe de raiz ser fator (caminho) crítico na determinação da produtividade global da instalação de tubos com soldagem mecanizada. Este se caracteriza também por ser o passe mais difícil de fazer devido à exigência de garantir a penetração completa da raiz e boa aparência do perfil da raiz (MOHAMED, 2005), além de ser o mais crítico em termo de corrosão e resistência a fadiga (PÉPE, 2010).

Pesquisadores do *The Welding Institute* (Inglaterra) obtiveram uma transferência do tipo spray através da utilização de uma corrente cujo valor médio era inferior a corrente normalmente utilizada na transferência por curto-circuito, mas que passava por picos acima desta (NEEDHAM, 1965). A ideia do processo chamado GMAW-P (conhecido no Brasil como MIG pulsado) é manter o arco através de uma corrente de

base relativamente baixa e, para promover e controlar o destacamento da gota impor picos de corrente (daí o nome pulsado) (LIRATZIS, 2007). Este mesmo autor, com uso da automação e controle da soldagem, investigou a aplicação da técnica dual tandem para o GMAW-P para alcançar altas produtividades na soldagem do aço X-100 para aplicação em tubos on-shore.

Os processos de soldagem que fazem uso da transferência por curto-circuito controlado são na verdade processos derivativos do processo GMAW convencional, nos quais os métodos de controle externo permitem uma melhoria na transferência metálica. O desenvolvimento destes processos tem como objetivo aproveitar as vantagens da transferência metálica por curto-circuito (baixo aporte térmico, soldagem em todas as posições, etc.) reduzindo substancialmente os problemas encontrados nos processos convencionais, tal como a alta geração de respingos e fumos, além de irregularidade na transferência metálica (KVASOV, 2000).

A empresa *Lincoln Electric* lançou inicialmente a tecnologia STT (*Surface Tension Transfer*) que foi desenvolvida prometendo um avançado controle do processo de curto-circuito usando uma fonte inversora de alta potência. Este processo foi primeiramente patenteado em 1988 mas somente em 1994 a primeira unidade comercial foi produzida e vendida pela *Lincoln Electric Company* (DERUNTZ, 2003).

Em 2004, a *Miller Electric* introduziu uma nova tecnologia de soldagem chamada de RMD (*Regulated Metal Deposition*) que é aplicada para a modificação do modo como se dá a transferência por curto-circuito no processo GMAW. Mais precisamente, essa tecnologia controla a corrente durante todas as fases do processo de curto-circuito e promete reduzir a entrada de calor na chapa em até 20% em comparação com os processos convencionais GMAW (MILLERWELDS, 2004).

Já em 2005, a *Fronius* introduziu uma nova tecnologia de soldagem patenteada como *Cold Metal Transfer* (CMT). CMT é um modo controlado do processo de soldagem GMAW, em que a transferência de gota usa uma oscilação mecânica do arame-eletrodo (HIMMELBAUER, 2005). Quando o arco plasmático é estabelecido o arame se move para a poça de fusão até que toque a poça de fusão, momento em que ocorre o curto-circuito, então a corrente torna-se menor e o eletrodo é retraído com o propósito de melhorar o destacamento da gota (FRONIUS, 2005).

É importante ressaltar que, neste trabalho, para maior facilidade de comunicação escrita, a nomenclatura “Processo GMAW com transferência metálica por curto-circuito controlado utilizando-se fonte comercial RMD/STT/CMT do fabricante

Miller/Lincoln/Fronius” será resumida na forma “Processo RMD/STT/CMT”. Deve-se lembrar de que a primeira nomenclatura é aquela tecnicamente correta, mas para simplificação escrita, a segunda será adotada.

### 3.1.2.1. Processo STT

Neste processo, o metal se transfere devido à força da tensão superficial. Segundo DERUNTZ (2003), a transferência por curto-circuito com controle da corrente de soldagem, proporciona ao processo STT as seguintes vantagens quando comparado com o GMAW convencional: permite controlar o aporte térmico durante a soldagem, reduzindo as descontinuidades do material; diminuindo a perda de material por respingos e, devido ao controle adequado da corrente proporciona um cordão estreito, uniforme e de boa penetração como também maior velocidade de soldagem, sendo utilizado em todas as posições de soldagem.

O método usado pela STT baseia-se em manter a corrente em valores relativamente baixos. Este valor, entretanto, não deve ser demasiadamente baixo, pois desempenha um papel vital na manutenção da gota ainda não destacada no estado líquido.

Uma corrente de base entre 50 A e 100 A mantém o arco e contribui para o aquecimento do metal de base. Após o eletrodo inicialmente tocar a poça de fusão (ou seja, após detectada uma redução da tensão), a corrente de base é reduzida. Este nível de corrente é mantido de forma que a gota ainda não se destaque até que seja aplicado uma corrente de *pinch*. Devido ao efeito *pinch*, ocorre uma redução sensível da seção transversal da ponte líquida que é medida através da variação da tensão pelo tempo. Com isso, a fonte consegue interpretar o momento preciso em que a gota irá se destacar. Neste momento, a fonte age de maneira a diminuir a corrente para níveis entre 45 A e 50 A, proporcionando uma transferência suave e com mínimos respingos. Neste instante em que o arco está ainda apagado, uma corrente de pico é aplicada para o restabelecimento do arco. Esta corrente também é responsável por aumentar a força devido ao jato de plasma fazendo com que ele comprima a poça contra o metal de base, evitando que um curto acidental aconteça. Também é responsável por manter aquecida a ponta do eletrodo (para formação de nova gota), a poça e a junta soldada. Durante a formação da gota, a corrente é reduzida de forma gradual (*tail-out*) até que seja

alcançada novamente a corrente de base, repetindo-se o ciclo de transferência. O controle de *tail-out* ajusta a taxa na qual a corrente muda de pico para corrente de base (Figura 7). De certa forma, o *tail-out* é um ajuste grosseiro do aporte térmico.

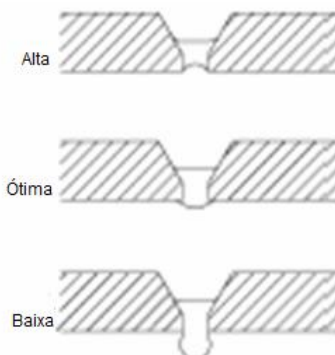


Figura 7. Influência da corrente de base no passe de raiz (BARBOSA, 2011)

A taxa de redução da corrente é muito importante para amortecer mecanicamente a agitação da poça de fusão, o que poderia acontecer caso a corrente fosse reduzida de repente (PONOMAREV, 2008). A Figura 8, explica de forma esquemática o processo STT.

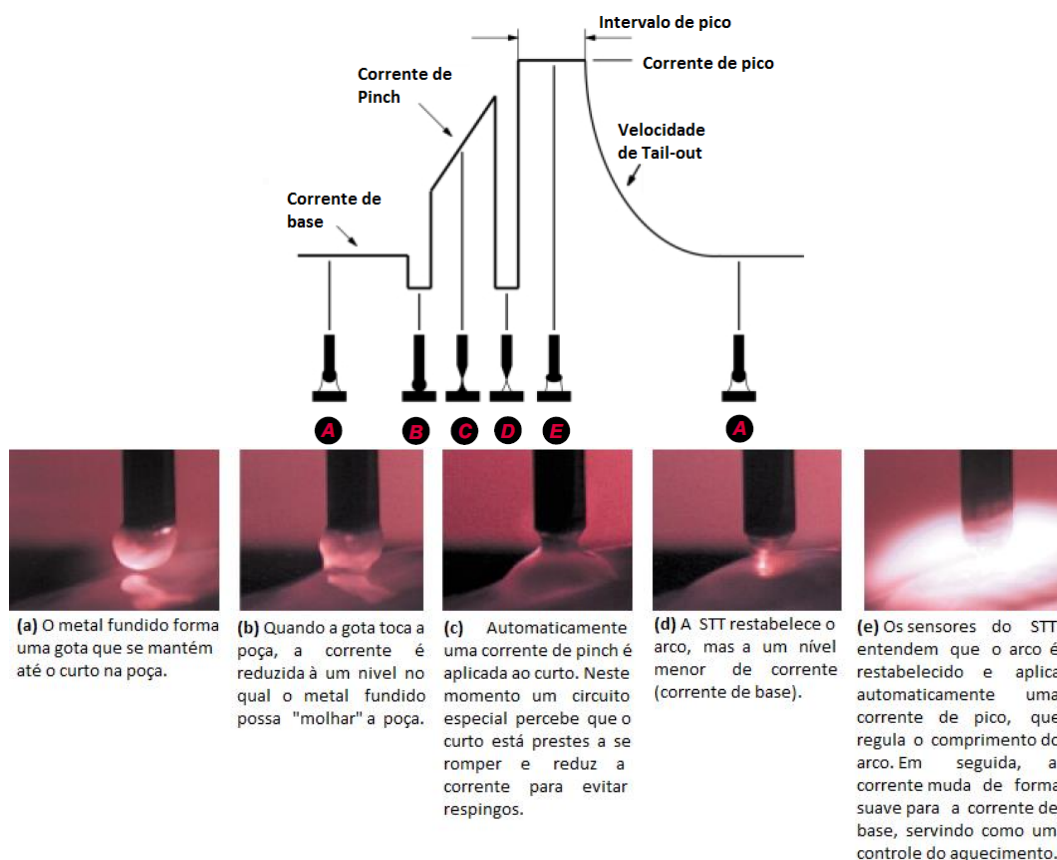


Figura 8. Explicação do formato de onda do processo STT (LINCOLN ELETRIC, 2005)

Lamond e Lee (LAMOND; LEE, 2007) comentam que o passe de raiz em chanfro estreito em tubulações é o passe mais crítico por uma série de razões. Primeiramente ele afirma que este é o passe mais difícil de ser executado visto que exige muita habilidade uma vez que a junta varia muito com relação a sua abertura e desalinhamento. Em segundo lugar, Lamond e Lee afirmam que o passe de raiz é que determina a velocidade de construção dos dutos. Ainda neste trabalho, os autores também afirmam que o processo STT tanto utilizado de forma manual, como mecanizada, aumenta muito a produtividade em relação a passes de raiz executados com eletrodo revestido.

### 3.1.2.2. Processo RMD

O RMD (*Regulated Metal Deposition*) é outra tecnologia baseada em curto-circuito controlado, mas que foi desenvolvida e patenteada pela empresa Miller. De acordo com um relatório técnico da própria Miller, o processo promove uma menor transferência de calor e de respingos de solda além de melhorar a qualidade visual, que por sua vez, reduz os custos associados com o retrabalho e limpeza (MILLERWELDS, 2004). As aplicações para a RMD incluem, passe de raiz em tubulações, soldagem de metal de pequena espessura, soldagem de aço inoxidável e outras ligas sensíveis ao calor.

O formato de onda da corrente neste processo é dividido em sete fases sendo que um software controla a corrente em cada uma dessas fases (CUHEL, 2008), como pode ser visto na Figura 9.

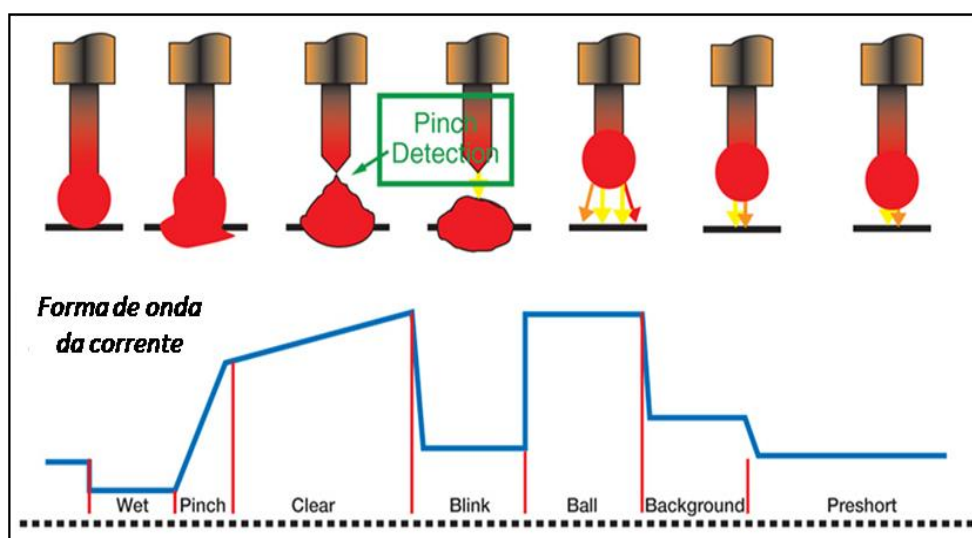


Figura 9. Representação esquemática do formato de onda da corrente para o processo RMD (Modificado de Miller, 2004)



Na fase inicial do ciclo de transferência (*Preshort*), a gota metálica é formada na ponta do arame-eletrodo e na fase (*Wet*) reduz-se a corrente em um nível mais baixo até o momento que ocorre o curto-circuito. Durante o curto-circuito, o formato de onda da corrente se divide em duas fases. Na primeira fase deste período, denominada de fase *Pinch*, após a gota tocar a poça de fusão, a corrente é elevada rapidamente, aumentando a intensidade da força eletromagnética para facilitar o destacamento da gota. Na segunda fase, denominada de *Clear*, a corrente continua crescendo, porém, à taxa mais moderada, até o momento que o fim do curto-circuito é detectado pelo controle da fonte, ou seja, momento em que ocorre a formação do estrangulamento (ou empescoçamento) na interface da gota com o eletrodo. Assim a gota é impulsionada em direção à poça de fusão devido à ação do efeito *Pinch*, porém, a subida de forma moderada da corrente de curto-circuito nesta fase, favorece que o rompimento da ponte metálica seja mais suave, reduzindo a geração de respingos. Após o destacamento da gota, a corrente é novamente reduzida por um curto período (fase *Blink*), a fim de que a reignição do arco elétrico também ocorra de forma suave para evitar a formação de respingos. Em seguida, a corrente é novamente elevada (fase *Ball*), proporcionando a formação de uma nova gota metálica na ponta do arame-eletrodo. Nas fases *Background* e *Preshort*, a corrente é reduzida gradualmente, em forma de degraus, para permitir o contato da nova gota com a poça de fusão, o que também garante maior estabilidade a poça de fusão (COSTA, 2011).

A estabilidade da poça de fusão é uma das vantagens do processo RMD, característica responsável por promover uma fusão mais uniforme do metal de base, resultando em menores incidências de falta de fusão. Outra vantagem deste processo é sua capacidade de manter o comprimento do arco constante independente de bruscas variações da DBCP, fato que contribui para a melhor qualidade da soldagem semiautomática. Por esse motivo, este processo tem sido cada vez mais usado na construção de dutos e tubulações, certamente pela maior produtividade em relação aos processos eletrodo revestido e TIG (POSSEBON, 2009).

Além do ajuste da velocidade de alimentação, o processo RMD conta ainda com o *Arc Control* e o *Trim*, que influenciam tanto nas características geométricas como no próprio desempenho do processo. O ajuste do *Arc Control* é responsável pelo aquecimento do metal de base, garantindo ao processo um maior controle da poça de fusão. Na medida em que se aumenta este parâmetro, aumenta-se a quantidade de calor transferida para o metal de base, o que reflete em maior molhabilidade resultando em

cordões mais largos e com baixa penetração. Já o *Trim* é responsável pelo ajuste do comprimento do arco assim como faz a tensão. Quanto menor o valor do *Trim*, mais estreitos se tornam os cordões, além do que favorece uma transferência mais instável e com mais respingos(COSTA, 2011).

### 3.1.2.3.Processo CMT

Os processos descritos nos dois últimos itens, a saber, STT e RMD, promovem o controle do curto-circuito de forma eletrônica. O processo CMT (*Cold Metal Transfer*), desenvolvido pela Fronius e patentado em 2005, apresenta aliada a eletrônica uma forma mecânica de controle do arco. O CMT utiliza um arco curto para conseguir uma transferência por curto-circuito. A grande inovação do processo consiste no fato de que o controle do comprimento do arco é feito através da movimentação do arame-eletrodo (Figura 10). A cada curto-circuito, o controle do processo impõe uma pausa de corrente e inicia, após um breve intervalo, uma retração do arame, seguida de um novo avanço. Este avanço-retrocesso do arame pode atingir frequências de até 70 Hz (Pépe, 2010), e tem a função de separar o arame da poça de fusão, garantindo a transferência de uma forma extremamente suave. O resultado é um tipo de sucessão revezada “quente-fria” (quente durante o arco aberto e frio durante o curto-circuito, em que a corrente é bem baixa) reduz consideravelmente o aporte de calor (Ponomarev, 2008) e por esse motivo, a soldagem de alumínio é tão explorada (FENG, 2008).

No processo CMT, o mecanismo de transferência metálica ocorre de acordo com a Figura 10 começando em A e indo até D, como descrito a seguir.

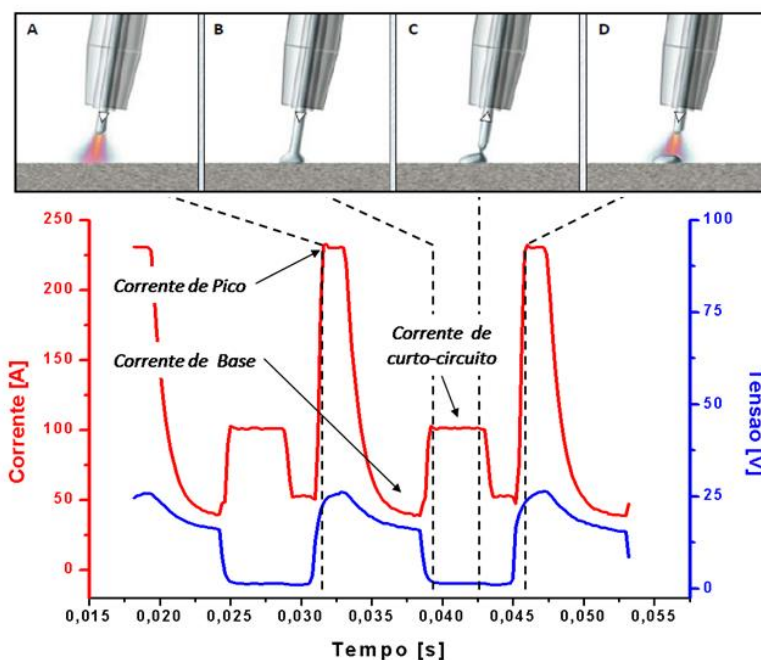


Figura 10. Principais fases do processo de transferência CMT (Modificado de COSTA, 2011)

- Fase A: durante a fase de arco aberto, o metal de adição é movido até a poça de fusão. Nesta fase uma corrente mais baixa é mantida para manutenção do arco e formação da gota metálica. A gota neste instante tem um diâmetro próximo ao do metal de adição.

- Fase B: No instante em que o metal de adição toca a poça (sentido pela queda da tensão) o arco é extinto e ocorre o curto-circuito. A tendência da corrente é subir indefinidamente, entretanto o controle eletrônico da fonte limita essa corrente de curto-circuito e a mantém até que o movimento de retração do arame seja iniciado.

- Fase C: O movimento para trás do arame-eletrodo vai ajudar o mecanismo de destacamento da gota durante o curto-circuito, permitindo que esta transferência se dê de maneira suave e com mínimos respingos. Após destacada a gota, o arco ainda está apagado e por isso uma corrente de pico é impressa fazendo com que o arco se restabeleça.

- Fase D: O movimento do arame é revertido (no sentido de avançar contra a poça) para se iniciar o processo novamente. Neste instante, e até que um novo curto aconteça, a corrente é a de pico. Este alto valor de corrente é responsável pela re-ignição do arco bem como pelo início da formação da gota.

FENG (2008) estudou o mecanismo de transferência de metal no processo CMT. Este autor descobriu que a condição de estabilidade crítica de ruptura da ponte líquida está associada com a gota metálica, que tem um tamanho semelhante ao diâmetro do metal de adição. A estabilidade do curto-circuito é devido ao sistema de movimento mecânico, que retrai o metal de adição em uma condição de baixo nível de corrente, ajudando a ruptura da ponte líquida. Eles ressaltaram que no processo de curto-circuito convencional o curto-circuito é devido ao alto nível de corrente presente durante este período.

Para melhor entendimento do movimento de “vai e vem” do arame-eletrodo, a Figura 11 apresenta uma montagem esquemática do processo CMT.

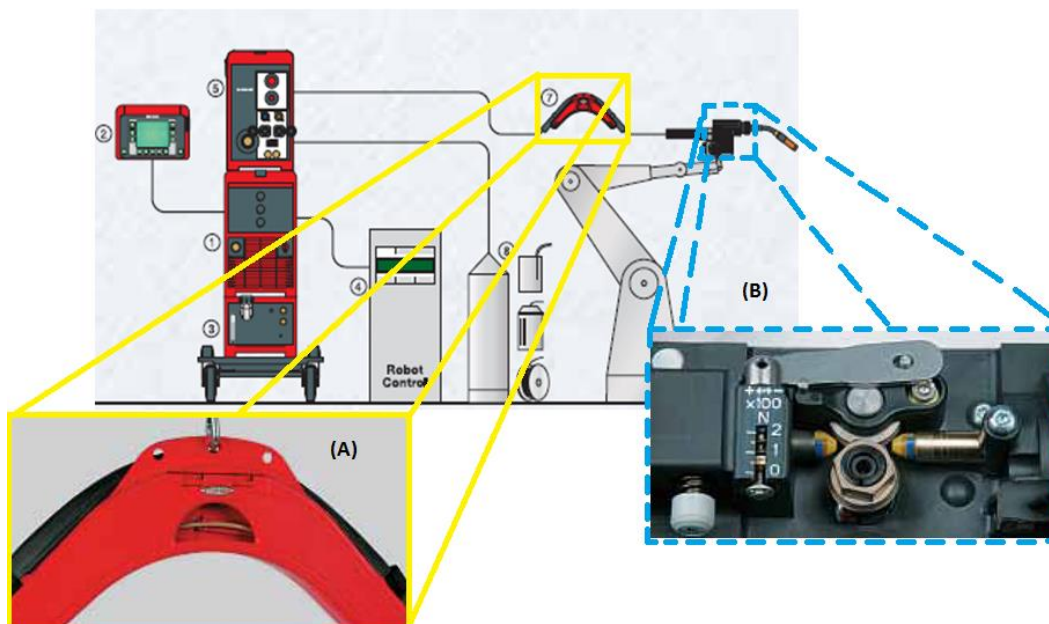


Figura 11. Montagem Esquemática do Processo CMT robotizado. Em detalhe: (A) – “Pulmão ou Compensador de Arame”; (B) – Alimentador dianteiro (MAGALHÃES, 2012)

É possível notar pela Figura 11 que para o processo CMT existem 2 alimentadores de arame. O primeiro, indicado pelo número 5, é um alimentador convencional do processo GMAW. Todavia, o alimentador em destaque (B) é o grande trunfo do processo de “Transferência Metálica Fria”, responsável por executar o avanço e o retrocesso do arame nas condições descritas anteriormente. Este alimentador é montado na própria tocha, onde há os roletes que impulsionam o arame. Quando ocorre o retrocesso do arame-eletrodo por parte do alimentador da tocha, o alimentador traseiro continua empurrando arame para a tocha. Para não haver um deslizamento sobre os roletes, ou mesmo uma compressão excessiva sobre o arame, o cabo da tocha aloja um

“pulmão”, ou seja, um sistema que permite o armazenamento do arame que por um lado está sendo empurrado para frente e por outro (alimentador dianteiro) está sendo empurrado de volta. O sincronismo dos dois motores não é tarefa fácil e deve ser bem feito para que um motor não sobrecarregue o outro. Outra dificuldade deste processo é que devido a complexidade da tocha, o custo se eleva consideravelmente, além do que frente dificuldade de manutenção de um comprimento de arco por parte de um soldador, este processo necessita de automação.

### **3.2.Soldagem orbital**

A soldagem orbital caracteriza -se pelo tipo de movimento/trajetória realizado pela tocha e/ou peça. Na posição 1G, o tubo gira e a tocha permanece parada, sempre soldando na posição plana. Procedimentos onde a tocha é mantida parada são denominados em inglês como *Stationary Welding*. Na posição 2G, o eixo do tubo fica na vertical e a soldagem é realizada na horizontal, através da movimentação da tocha ao longo do tubo. Na posição 5G, o eixo do tubo é que fica na horizontal, e a soldagem é realizada através da movimentação da tocha desde a posição plana até a sobrecabeça, passando pela vertical. Os procedimentos em que a peça é mantida parada e a tocha é movimentada são encontrados na literatura como *Circular/Orbital Welding* (LUKKARI, 2005). Por fim, na posição 6G, o eixo do tubo fica inclinado em relação à horizontal e a tocha se movimenta desde a posição 12 horas até a posição 6 horas em semelhança a um relógio analógico. A soldagem de linhas dutoviárias é composta pela posição 5G quando o tubo está sendo soldado em uma região de topografia plana e pela posição 6G quando em uma subida de serra, por exemplo. Como o termo orbital na etimologia da palavra implica em um giro completo, na soldagem de meia cana (metade do tubo) considera-se mais adequado a utilização do termo soldagem circunferencial.

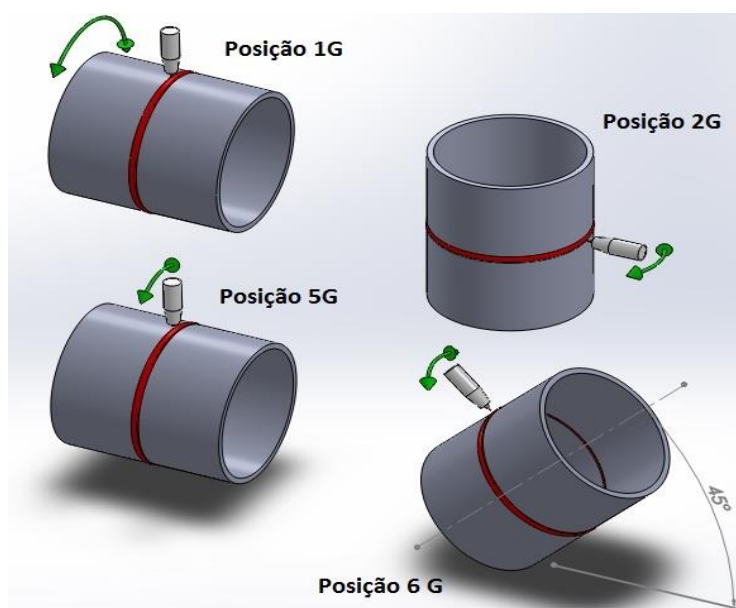


Figura 12. Posições de Soldagem em tubulações (Adaptado de AWS, 2010)

Na soldagem estacionária, diferentes processos de soldagem podem ser aplicados, sendo inclusive possível a utilização do processo arco submerso, uma vez que como se solda apenas na posição plana, a distribuição do fluxo não fica prejudicada. No entanto, como neste método quem gira é o tubo, grandes limitações se impõem na soldagem de dutos. Devido à impossibilidade de rotação da peça, nestes casos há a necessidade de soldar variando as posições de soldagem da tocha, exigindo assim, procedimentos/processos aplicáveis a todas as posições de soldagem.

Já a realização da soldagem de tubulações na posição 5G apresenta um grau elevado de dificuldade, especialmente se for executado de forma manual, o que exigiria do soldador habilidade em realizar soldas em todas as posições, plana, vertical ascendente ou descendente e sobre cabeça. Entre as dificuldades, destaca-se a de manter o perfil correto do cordão de solda, o que acarreta em falta de fusão e de penetração (PEREIRA, 1995).

A soldagem circunferencial pode ser realizada de forma manual, semiautomática, mecanizada ou mesmo automatizada. A norma AWS A3.0 (2010) define bem cada um desses níveis de automação em soldagem.

A soldagem manual é aquela realizada com a tocha ou porta-eletrodo segura e manipulada pela mão do humano. Assim, todas as tarefas, relacionadas com a execução e controle contínuo da soldagem, são feitas através das mãos do humano, sendo de

responsabilidade do soldador. O processo eletrodo revestido para soldagem de tubos em campo, por exemplo, é essencialmente uma soldagem manual.

Por outro lado, no caso da utilização do processo GMAW ou FCAW (*Flux Cored Arc Welding*), a alimentação é feita pelo cabeçote da fonte, ao passo que a movimentação da tocha é de responsabilidade do soldador. Nesse caso, o processo é dito semiautomático.

Já a soldagem mecanizada é aquela com equipamento que requer ajustes manuais no controle do equipamento em resposta à observação visual da soldagem, com tocha ou porta-eletrodo sustentados por um dispositivo mecânico. A intervenção do soldador consiste em ajustar os controles do equipamento em função de sua observação visual da operação. Na soldagem arco-submerso, por exemplo, dado o peso do conjunto o processo somente é realizado utilizando-se um dispositivo mecânico de movimentação.

Por outro lado, caso a soldagem seja realizada com equipamento que requer somente observação ocasional ou nenhuma observação da solda e nenhum ajuste manual nos controles do equipamento, esta é dita uma soldagem automatizada. Magalhães (2012) e Nascimento (2015) soldaram com cabeçotes orbitais simples com o processo GMAW. Entretanto, como salientado pelos autores, correções de trajetória e DBCP foram necessárias ao longo da solda (processo mecanizado). Caso nenhum ajuste manual tivesse sido realizado, poder-se-ia classificar esta solda como automatizada (AWS A3.0, 2010).

Por fim, a norma AWS A3.0 (2010) ainda classifica o processo de soldagem com controle adaptativo. Esta é uma soldagem com equipamento que possui um sistema de controle que automaticamente determina mudanças nas condições de soldagem e atua sobre o equipamento para que a ação apropriada seja executada. Sensores são utilizados para detectar problemas e o controle realiza as mudanças necessárias nos parâmetros de soldagem, em tempo real, para produzir soldas de qualidade.

A primeira e principal vantagem da soldagem de tubos orbital mecanizada frente a soldagem manual mencionada em vários estudos é a atual escassez de soldadores qualificados. Na soldagem mecanizada, um operador pode controlar várias máquinas e um procedimento inteiro. Apesar da execução de um conjunto de operações de forma

controlada, onde variáveis são definidas para garantir um maior grau de precisão, no sistema mecanizado o soldador ainda desempenha um papel importante (BENWAY, 2000). Além do mais, os atuais sistemas de soldagem orbital são portáteis, de fácil manuseio, com boa precisão e repetitividade com um custo eficaz que os tornam uma forma mais prática para uma gama de aplicações (BRIOUX, 2010; LATIFI, 2012).

A qualidade da soldagem de união de dutos na soldagem manual tem íntima relação às tendências e habilidades de cada soldador. Em virtude disso, a baixa repetitividade na execução da tarefa e a quantidade de reparos, tem como consequência o aumento no prazo de execução uma linha dutoviária.

A soldagem GMAW orbital mecanizada, em contrapartida, varia em função do nível de tecnologia empregada. Com a crescente demanda por redução de tempo e consequentemente custo das obras, diversas empresas do mundo todo se empenharam no desenvolvimento de equipamentos voltados para a automação da soldagem de união de dutos. Como exemplos tem-se na Figura 13, os manipuladores da DYNATORQUE (a), POLYSOUDE (b), GULLCO (c), WELDINGBUG (d), MAGNATECH (e), e por fim da CRC- EVANS (f). Torna-se perceptível que o surgimento dessa grande quantidade de equipamentos (que são empregados mundialmente para a soldagem de união de dutos) é fruto do aquecimento do mercado em consequência do aumento das malhas dutoviárias.



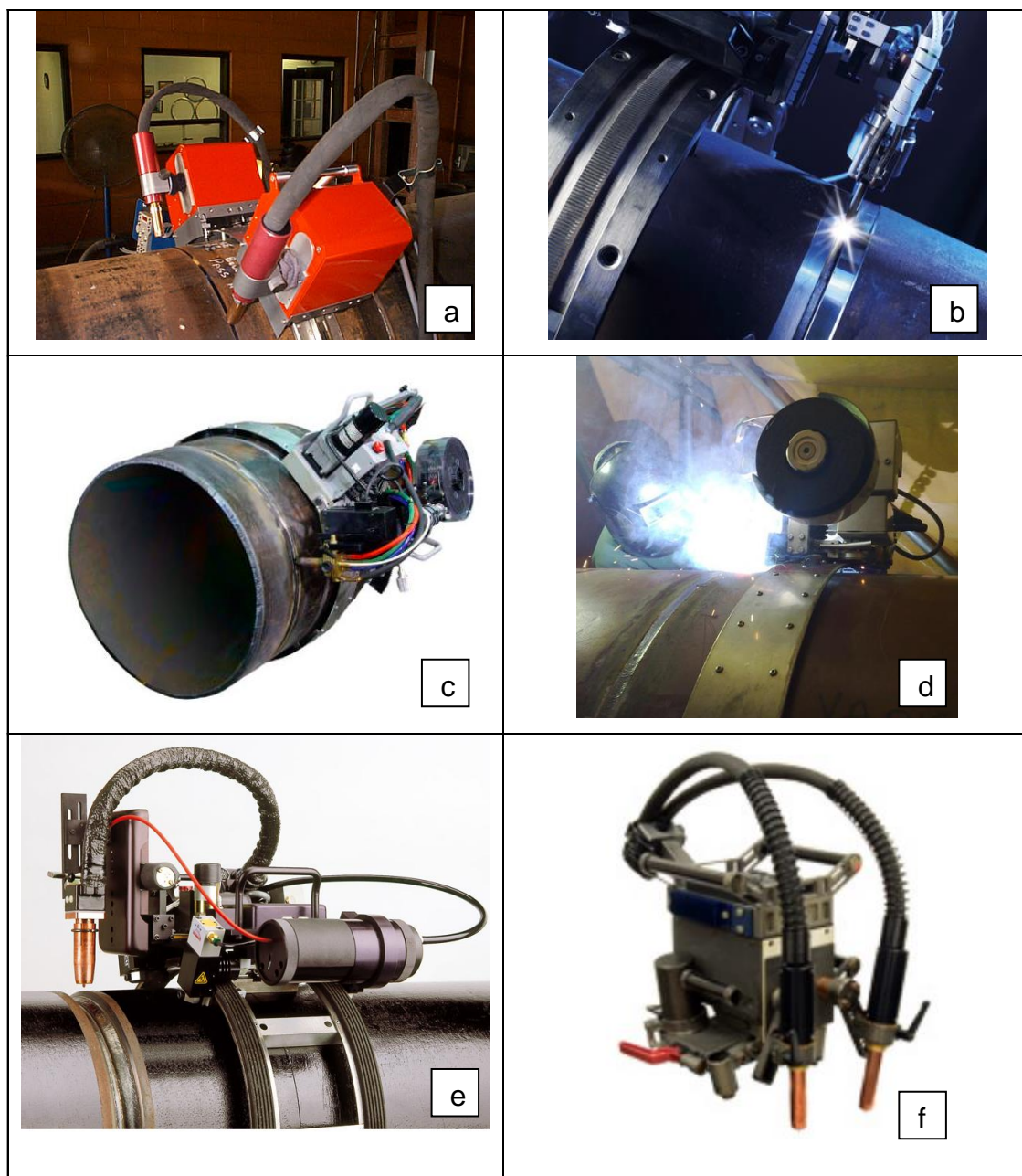


Figura 13. Manipuladores para soldagem orbital disponíveis no mercado. (DYNATORQUE, 2014), (POLYSOUDE, 2014), (GULLCO, 2014), (AUTOMATIC WELDING SYSTEMS, 2009), (MAGNATECH, 2014), (CRC-EVANS, 2014)

Como se pode observar no equipamento da CRC-EVANS (Figura 13-f), dependendo do número de tochas utilizadas durante a soldagem, a taxa de deposição do GMAW orbital pode ser de até 6 kg/hr com taxa típica reparação entre 3% e 5% (VIETZ, 2006). Para se ter uma ideia, a taxa de deposição do eletrodo revestido gira em torno de 1,36 kg/hr. Assim, a eficiência de deposição do GMAW também é maior (90%

contra 65%), o que leva a uma redução de custos de soldagem (21 euros contra 113 euros) (ESAB, 2003).

Os processos de soldagem automatizada fornecem mais uniformidade, qualidade e os resultados são consistentes e repetíveis dado que os sistemas podem variar parâmetros, tais como velocidade de soldagem, DBCP, níveis de corrente, dentre outros (MOON, 2002; BENWAY, 2009; BRIOUX, 2010). O número de defeitos é minimizado e o procedimento pode ser repetido várias vezes, facilitando a soldagem de juntas similares em grande quantidade (BISHOP, 2008).

De acordo com BISHOP (2008), novos equipamentos para soldagem orbital conseguem gerar automaticamente programas específicos. O soldador deve entrar com os dados do material, diâmetro e espessura do tubo e então a máquina gera um arquivo com o programa a ser utilizado.

Diversas técnicas visam desenvolver e melhorar as tecnologias inteligentes para soldagem orbital de tubos, como os sistemas de visão e controle inteligente em tempo real (LOGUE, 1988; KIM, 1993; KWAK, 2002; MOTA, 2011), além de mapeamento térmico (KWAK, 2002).

No entanto, este controle de parâmetros que é chamado de soldagem adaptativa não é usado na soldagem de passe de raiz, pois ainda não há garantia de penetração da solda. De acordo com LATIFI (2012), o controle adaptativo do processo de soldagem orbital deve ser executado durante a soldagem do passe de enchimento. Há duas razões para isso: primeiro, área/altura da junta, ou às vezes de um dos chanfros é maior do que o outro, por conseguinte, para compensar esta diferença os parâmetros de soldagem devem ser diferentes em cada lado da junta. Em segundo lugar, às vezes no processo de fabricação do tubo, especialmente em tubos com grande diâmetro, a espessura de um lado é muito maior do que o outro. Consequentemente, as velocidades de alimentação/soldagem, níveis de corrente/tensão devem ser ajustados para compensar as variações da junta soldada.

Por outro lado, Lamond e Lee (2007) demonstram que a utilização de processos automáticos na execução do passe de raiz em tubo de grande porte aumenta muito a produtividade frente a processos semiautomáticos mecanizados ou mesmo manuais.

Abreu, Dutra e Broering (ABREU; DUTRA; BROERING, 2005) ponderam dizendo que à medida que se transferem as funções do soldador para um sistema controlado, a complexidade e o custo deste sistema aumentam exponencialmente. Então, a não ser que se tenha disponibilidade de recursos para este fim, deve-se utilizar o bom senso e encontrar um equilíbrio entre a soldagem manual e a automática.

No Brasil estudos relacionados à soldagem orbital automatizada têm sido realizados. PIGOZZO (2015) soldou um tubo de aço 1020 com chanfro em U (nariz de 2,0 mm) com processo TIG com alimentação de arame partindo da posição plana e seguindo por 360° até retornar a posição plana (soldagem orbital). Este observou que um único conjunto de parâmetros não se mostra adequado para as diversas posições de soldagem. Com um conjunto de parâmetros adequados para a posição plana, por exemplo, houve falta de penetração entre as posições 11h até as 7:30h (soldagem no sentido anti-horário). Pigozzo define as posições de soldagem ao longo do tubo na forma mostrada na Figura 14.

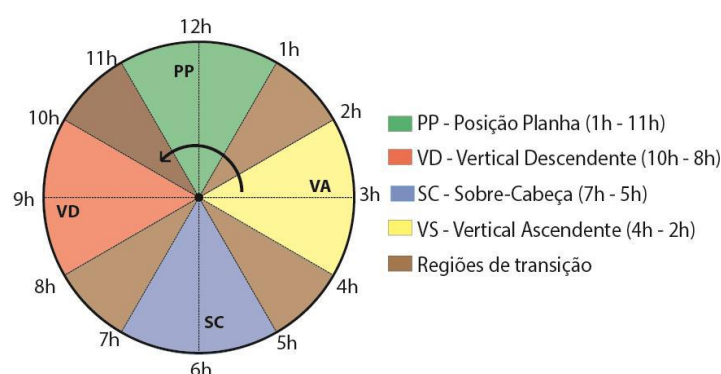


Figura 14. Representação das posições de soldagem orbital segundo PIGOZZO (2015)

Apesar de não deixar claro como realizou a variação de parâmetros ao longo da soldagem Pigozzo, variou a tensão, corrente e velocidade de soldagem ao longo das várias posições angulares durante a soldagem orbital. Estas variações foram realizadas separadamente, ou seja. Em uma solda variou-se a tensão, em outra a corrente e por fim, em uma outra variou-se a velocidade de soldagem. O objetivo do autor era conseguir manter constante as características geométricas do cordão de solda. Com a variação dos parâmetros, mesmo de forma independente, foi possível obter bons resultados. É sabido que a própria junta apresenta variações ao longo do tubo, dado inclusive a ovalização

permissível apontada na norma API 1104. Estas variações provocam desalinhamentos na junta levando a prova os parâmetros e os procedimentos de soldagem. A maior velocidade de soldagem alcançada por Pigozzo (2015) foi 13 cm/min na posição 7h.

Lima et al (2005) desenvolveram um robô orbital para soldagem de tubos. Eles mostram que cada posição de soldagem possui um conjunto de parâmetros ótimos.

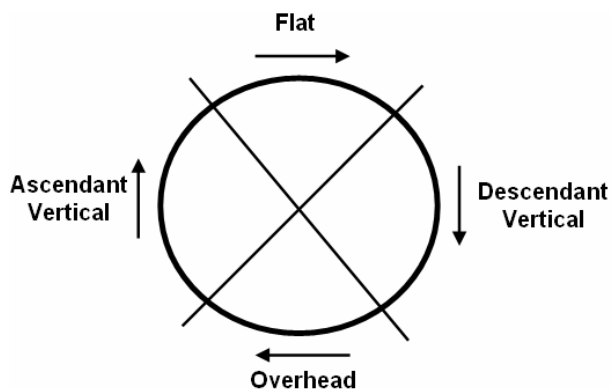


Figura 15. As quatro posições de soldagem na soldagem orbital segundo LIMA et al. (2005)

Utilizando os parâmetros levantados por Soraggi (SORAGI, 2004) em cada posição (plana/vertical/sobrecabeça) com os processos GMAW e FCAW, os autores soldaram ao longo do tubo partindo da posição sobrecabeça para a plana (sentido ascendente). Apesar de não apresentar faixas de variação, nem mesmo os parâmetros de soldagem, os autores comentam que os parâmetros devem ser interpolados em um pequeno intervalo de forma a evitar descontinuidades e heterogeneidades na poça. Para a determinação da posição angular, foi utilizado um inclinômetro desenvolvido por eles que possui um pendulo acoplado a um encoder.

Assim como caracterizado por Lima et al (LIMA et al., 2005) na Figura 15, Meller et al (MELLER et al., 2014) também definiu as posições de soldagem de forma apenas qualitativa (Figura 16).

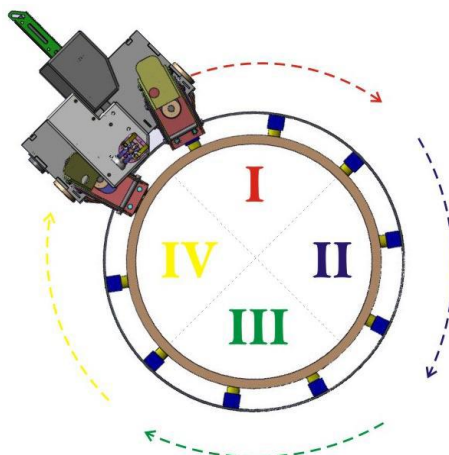


Figura 16. Posições de soldagem simuladas para a soldagem em dutos: I - plana; II - vertical descendente; III – sobrecabeça e IV - vertical ascendente. (MELLER et al., 2014)

Naturalmente associa-se as posições plana, vertical e sobrecabeça às posições 12h ( $0^\circ$ ), 15h ( $90^\circ$ ) e 18h ( $180^\circ$ ) respectivamente, assim como em um relógio analógico. No entanto, pouco se diz a respeito de onde começa e termina a posição plana, por exemplo. Assim, surge algumas questões diretas, como por exemplo “a transição entre a posição plana e vertical é um ponto fixo na posição 13:30h ( $45^\circ$ )?”.

Por fim, a Figura 17 da Norma AWS A3.0 (2010) define de forma mais detalhada a posição de soldagem para juntas de topo em tubos. Essa figura apresenta as posições de soldagem em função da inclinação do tubo ( $0^\circ$  a  $90^\circ$ ). Em  $0^\circ$ , o eixo do tubo se encontra horizontalmente, que define a posição de soldagem 5G. Em  $90^\circ$ , o eixo do tubo se encontra vertical, ou seja, define a posição de soldagem 2G (posição horizontal de soldagem). De forma intervalar, para  $45^\circ$  do eixo do tubo, se está na posição de soldagem 6G.

No contexto da tese, será definida para a posição de soldagem 5G que a posição de soldagem plana vai de  $0^\circ$  a aproximadamente  $20^\circ$ , a vertical descendente de  $20^\circ$  a  $100^\circ$  e a sobrecabeça de  $100^\circ$  a  $180^\circ$ . Assim, essas observações contradizem todos os autores anteriores, já todos eles fixaram o ângulo de  $45^\circ$  como transição de posições para o eixo do tubo posto horizontalmente. Dessa forma, se faz necessário estabelecer os limites das transições angulares para um correto ajuste de parâmetros, caso venham a variar ao longo da soldagem circunferencial.

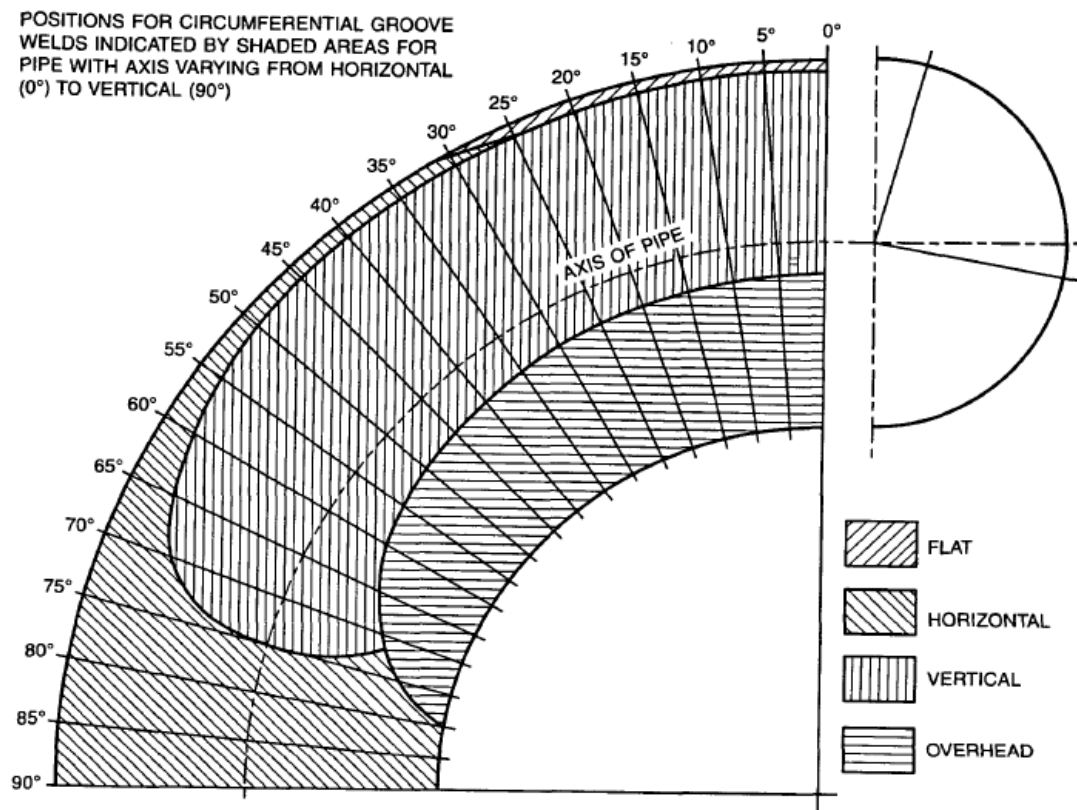


Figura 17. Posições de soldagem para juntas soldadas em tubo. (AWS A3.0, 2010)

## 4. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho abordará os materiais e métodos, equipamentos e instrumentação necessária para a realização deste trabalho. Por fim, será apresentada uma sequência metodológica dos ensaios realizados.

### 4.1. Materiais

Em conformidade com o trabalho anterior de Magalhães (2012), inicialmente utilizaram-se barras-chata de aço 1020 de 5/16 x 1" no comprimento de 320 mm para simular a soldagem em meia cana de um tubo de 8" de diâmetro (Figura 18), conforme será apresentado no Item 4.2.

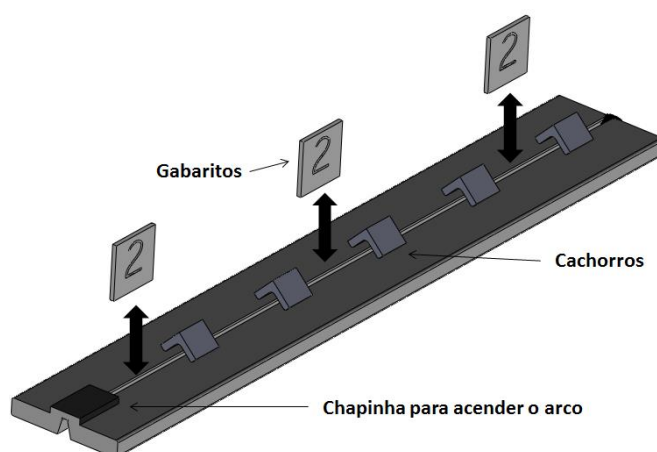


Figura 18. Montagem da junta em chapa (MAGALHÃES, 2012)

Os tubos utilizados para confecção dos corpos de prova foram utilizados como sendo de aço API 5L X65 com 8,0 mm de espessura e diâmetro interno de 8". Estes tubos são produzidos com 12 metros de comprimento além de possuírem revestimento externo. Com isto, muitas etapas de preparação precisaram ser realizadas para confecção dos corpos de prova. Destaca-se que os valores nominais do aço API 5L X65, segundo a API 5L (2012) são 450 MPa para o limite de escoamento, 535 MPa para o limite de resistência e 19,6% de alongamento (calculado com base na área de seção transversal de 200 mm<sup>2</sup> do corpo de prova).

A composição química do aço API 5L X65, segundo a API 5L (2012), é dada na Tabela 1.

Tabela 1. Requisitos químicos para o aço API 5L X65 (API 5L, 2012)

C (máximo) %	Mn (máximo) %	P (máximo) %	S (máximo) %
0,28	1,40	0,030	0,030

Uma análise química do material destes tubos foi realizada por Nascimento (2015). Estes dados podem ser visualizados na Tabela 2. Destaca-se nessa tabela, o baixo teor de carbono e o alto teor de manganês. Nesse caso, o valor de manganês foi superior ao permitido pela API 5L (2012), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 2. Composição química do metal de base utilizado

Amostra de X-65	
Elemento	Valor
B	0,0002
Sn	0,0012
Ca	0,0014
Co	0,0025
S	0,0033
W	0,0053
Ni	0,0129
Ti	0,0171
Cu	0,0175
P	0,0184
V	0,0253
Al	0,031
C	0,0526
Nb	0,0627
Si	0,1866
Cr	0,2075
Mo	0,2145
Mn	1,8165

Com relação ao carbono equivalente (CE) do material utilizado, encontrou-se  $CE(Pcm) = 0,179$  e  $CE(IIW) = 0,447$ , lembrando-se que quando o teor de carbono for menor ou igual a 0,12% deve-se utilizar o  $CE(Pcm)$ . A partir desses números, é possível inferir que o material possui boa soldabilidade (Nascimento, 2015).

A norma API 1104 especifica que o tubo de teste deve ter aproximadamente 9” de comprimento depois de soldado, ou seja, aproximadamente 4,5” para cada parte. Assim, o tubo foi cortado em pedaços de aproximadamente 5” para que então passasse pelo processo de usinagem (até que fique com aproximadamente 4,5”). No torno, o tubo é faceado dos dois lados e em virtude de sua ovalização, também é cilindrado



internamente dos dois lados. Isto se faz necessário para poder ajustar (centrar) os tubos no processo de formação da junta. Além disso, como essa ovalização pode chegar até 1% do diâmetro do tubo (API 5L, 2012), se os tubos não fossem igualados por dentro, ao se confeccionar o chanfro, seria impossível manter-se o nariz do bisel. Em seguida, inclina-se o carro do torno em  $15^\circ$  e usina-se o tubo até que reste um nariz de 1,0 mm neste bisel (Figura 19). A abertura da junta é de 3,0 mm.

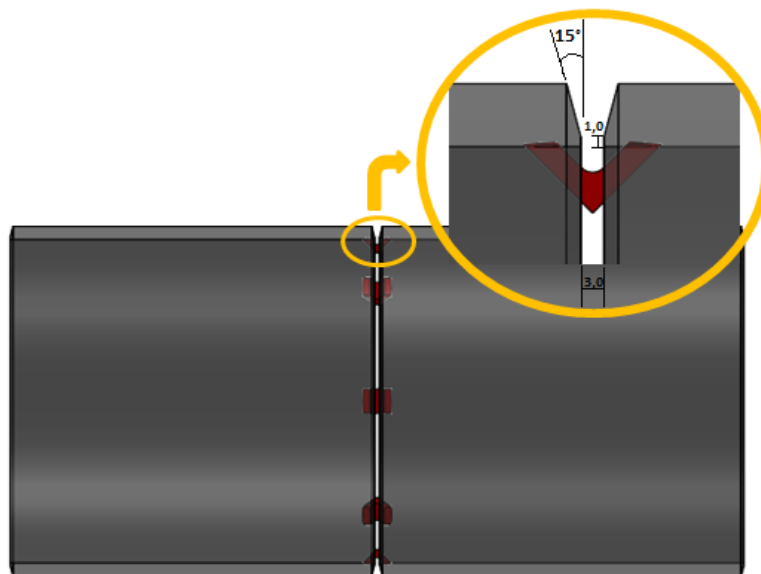


Figura 19. Montagem e detalhamento da junta a ser soldada

A montagem dos tubos de teste seguiu o esquema apresentado na Figura 20. Os tubos de testes foram montados em conjunto de três destes tubos em sequência. Com esta montagem é possível realizar a soldagem de um total de quatro cordões de solda, já que são soldados em meia canas. Assim, como há duas juntas de topo com duas meias canas cada uma, há um total de quatro soldas possíveis de serem realizadas.

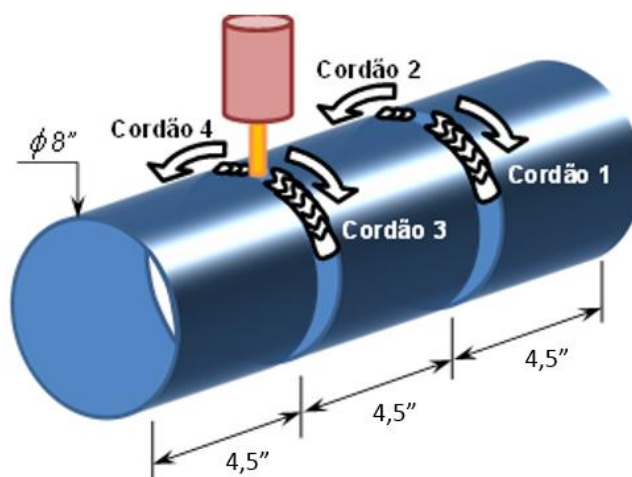


Figura 20. Esquema de montagem e execução das soldagens

Como sistema de fixação dos tubos, utilizou-se inicialmente pequenos dispositivos (“cachorros”), com 15 mm de comprimento, fabricados a partir de cantoneiras de 1/2 x 1/8”, posicionados em intervalos regulares internamente aos tubos para garantir que a junta não se alterasse ao longo da soldagem (Figura 21). A quantidade necessária de cachorros foi testada experimentalmente. A utilização dos cachorros foi para garantir que a junta estivesse livre de obstruções de forma a não afetar o arco, como poderia ocorrer se fossem utilizados pontos de solda. Entretanto, destaca-se que cachorros com maiores dimensões foram necessários, pois dadas as pequenas dimensões destes primeiros dispositivos, a região oxidada superficial foi modificada localmente (estreitamento mostrado na Figura 21-b) quando o arco elétrico passava sobre os dispositivos. Assim, os novos “cachorros” utilizados foram feitos a partir de cantoneira de 1.1/4” x 1/8” em que este efeito foi reduzido ou mesmo minimizado.

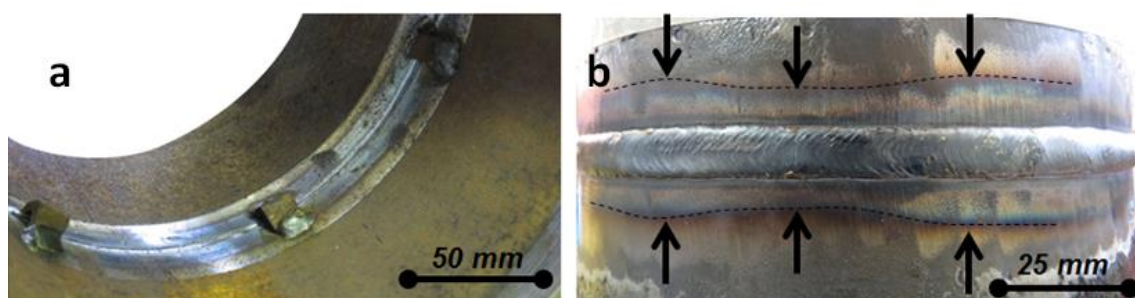


Figura 21. Detalhe do (a) sistema de fixação (“cachorros”) e (b) estreitamento da região oxidada em função da presença deste sistema

Entretanto, a maior dificuldade na construção das juntas concentrou-se na retirada do revestimento externo de polietileno. Iniciou-se o processo de retirada desse revestimento torneando-se externamente. Contudo, como já citado, o tubo possui uma ovalização e esta impede que o revestimento todo seja retirado, uma vez que de um lado do tubo começa-se a usinar o aço enquanto do outro ainda há revestimento. Para contornar este problema, foi adaptado no carro do torno uma lixadeira de 7” com disco de lixa grana 40. Enquanto a lixadeira gira em um sentido, o tubo preso à placa do torno gira no sentido contrário. A diferença entre o processo de torneamento com esse método se deve ao fato do corpo do disco da lixa ser confeccionado em plástico e compensar a ovalização do tubo, mantendo sempre o contato com este e retirando consequentemente, o revestimento.

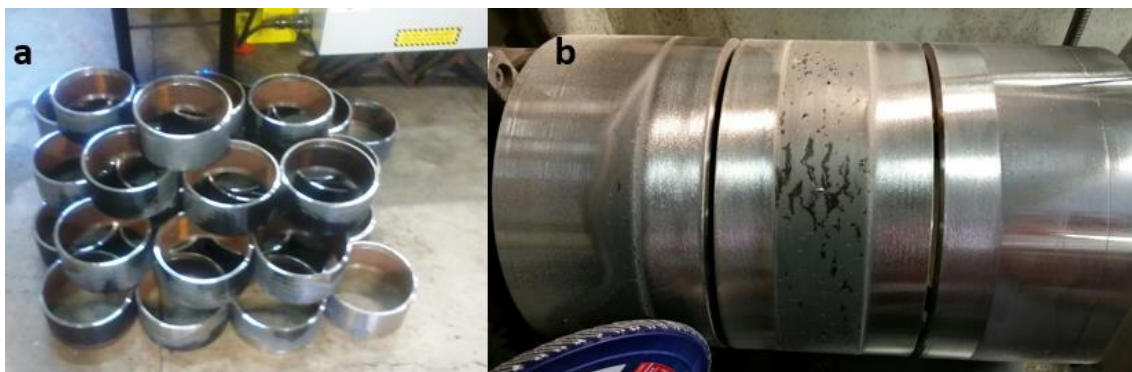


Figura 22. (a) Tubos cortados e chanfrados no torno, prontos à formarem a junta de topo com chanfro em V, (b) junta montada após o processo de limpeza com a lixadeira no torno

Por fim, utilizou-se para o levantamento dos parâmetros de enchimento em tubo usinado com uma geometria semelhante a do cordão de solda produzido no passe de raiz. Ou seja, este tubo simula uma junta como se o passe de raiz já tivesse sido realizado, faltando receber o enchimento (Figura 23). Com isso, economizou-se em soldas, uma vez que para cada teste de enchimento é necessária uma solda de raiz adequada.

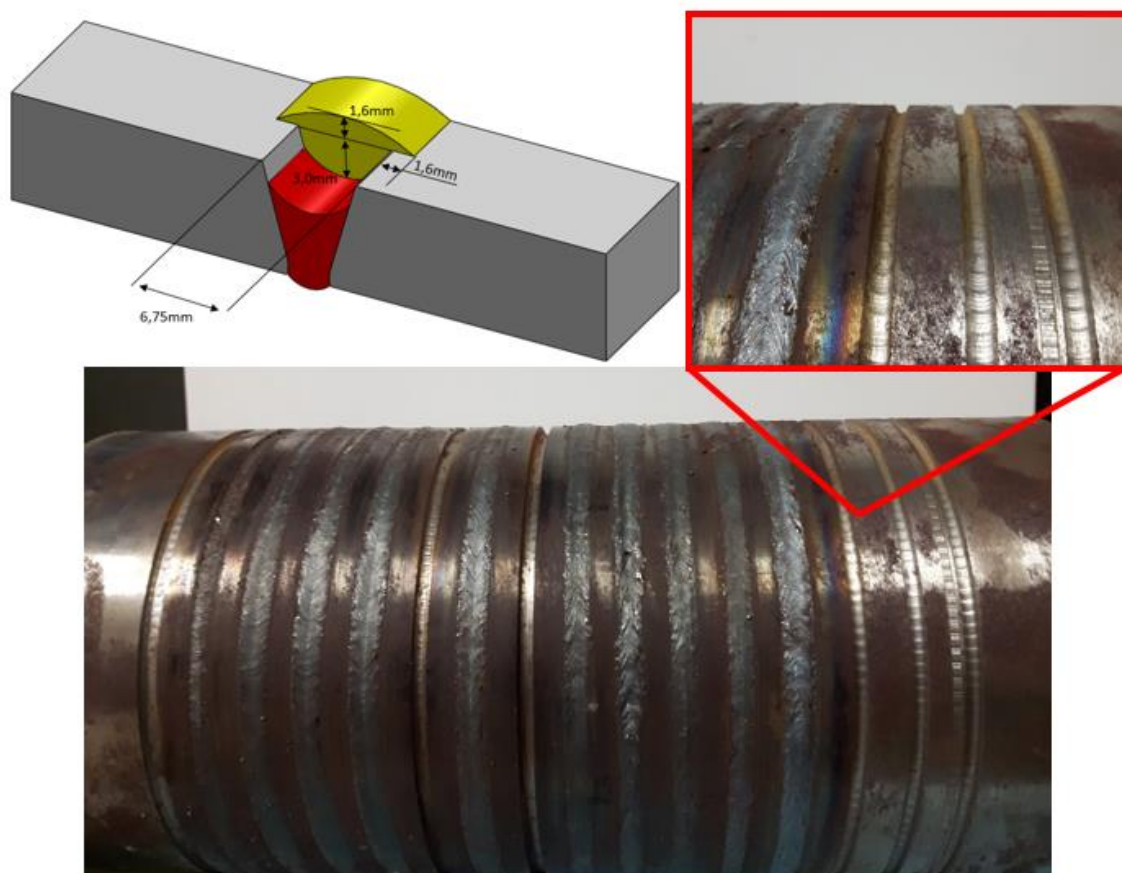


Figura 23. Tubo teste para parâmetros de enchimento

No tubo da Figura 23, foram usinados 16 rasgos que permitem 32 soldas de meia cana. Para a usinagem destes rasgos, foi preparada uma ferramenta de aço rápido com o desenho (“negativo”) do material que deve ser adicionado no passe de enchimento. É claro que a profundidade do rasgo e consequentemente a altura do cordão de enchimento sem o reforço varia um pouco de solda para solda e em também em função dos parâmetros da raiz. Entretanto utilizou-se este método como um ponto de partida para os parâmetros de enchimento.

Todas as soldas deste trabalho foram realizadas com gás de proteção de Ar+25%CO<sub>2</sub> e arame ER70-S6 de 1,2 mm de diâmetro. Para os passes de raiz, a DBCP utilizada foi de 18 mm e para os de enchimento 12 mm.

Embora Magalhães (2012) e Nascimento (2015) tenham usado um bocal para chanfro estreito, optou-se por somente usar este bocal para os passes de raiz. No enchimento utilizou-se um bocal semelhante aos comumente usados no processo GMAW, embora tenha sido construído em virtude das medidas da tocha utilizadas não serem padrão (Figura 24). O bocal para chanfro estreito se torna vantajoso quando se solda grandes espessuras e com difícil acesso (chanfro estreito). Para o chanfro em questão ele em nada auxilia, uma vez que devido à pequena abertura da face do chanfro ser de 6,75 mm (Figura 23), o bocal não acessa o interior do chanfro ficando do lado de fora. É verdade que ele concentra o fluxo de gás sobre a poça, mas no caso do enchimento, como a largura da poça e consequentemente do cordão é maior, acaba por pouco proteger a solda resultando em porosidades.

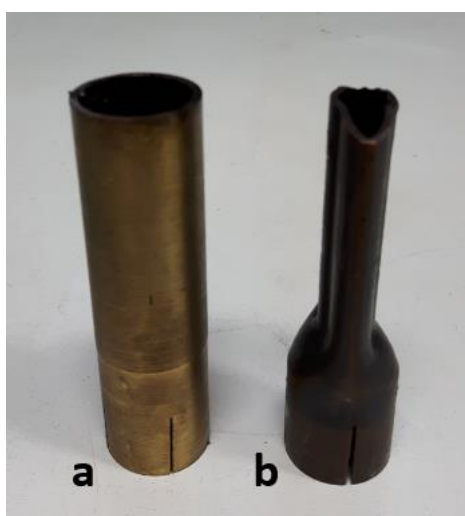


Figura 24. Bocais utilizados para os passes de (a) enchimento e (b) raiz.

## 4.2. Equipamentos

Uma vez que será utilizada a parametrização preliminar realizada no trabalho anterior de Magalhães (2012), deve-se inicialmente proceder-se à soldagem utilizando-se o Simulador de Soldagem de Dutos por Retificação (SSDR), como mostra a Figura 25. O equipamento em questão permite a execução da soldagem em chapa, que gira à medida que a tocha se desloca, simulando fisicamente uma soldagem circunferencial.

Assim, embora o foco tenha se dado na soldagem circunferencial em tubos, para o levantamento inicial dos parâmetros limites de soldagem em cada posição (plana/vertical/sobrecabeça), utilizou-se do SSDR já que com ele era possível colocar o corpo de prova em cada uma dessas três posições. Além do mais, devido as facilidades em se preparar o chanfro utilizado em chapa ao invés de tubo, foi possível poupar um bom tempo. Além de tudo, uma grande dificuldade persistia em se ter certeza de até onde (quantos graus) vai a posição plana e, onde se inicia/termina a vertical e a sobrecabeça. Este dilema se faz presente na soldagem em tubo, mas não em chapa, visto que as posições são discretas e foram colocadas em 0° (plana), 90° (vertical) e 180° (sobrecabeça).

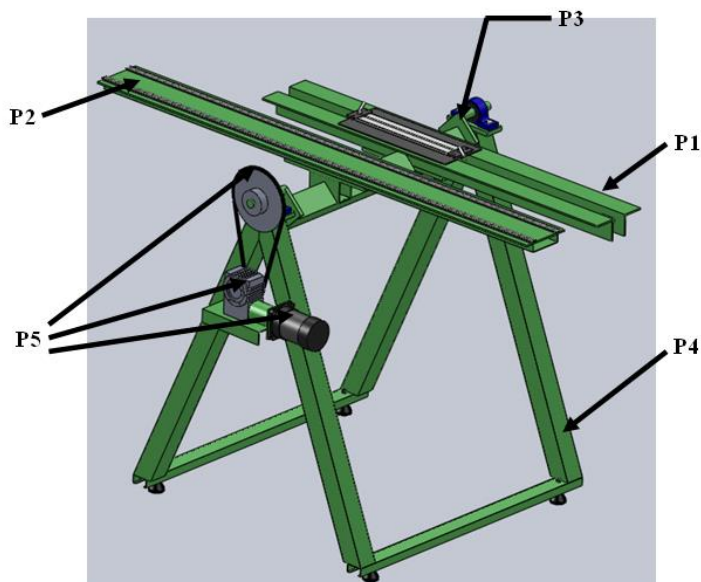


Figura 25. Vista esquemática do SSDR: P1: suporte da chapa; P2: suporte do trilho; P3: eixo excêntrico; P4: base e P5: acionamento (Magalhães, 2012)



Utilizaram-se as fontes mostradas na Figura 26 para a realização dos testes no SSDR e para a validação dos resultados em tubo, uma vez que cada fonte/fabricante possui seu processo derivado do GMAW. Salienta-se que a fonte da MILLER foi a utilizada para realizar os testes com o processo convencional. Por este motivo, esta mesma fonte foi utilizada para a realização dos testes com a variação de parâmetros em função da posição orbital. Espera-se com isso desvincular alguma possível variação que possa existir entre o processo convencional do GMAW em uma ou outra fonte de soldagem.



Figura 26. Fontes de soldagem utilizadas (Magalhães, 2012)

Para a soldagem circunferencial, foi necessária a construção de dispositivos que permitissem a movimentação do sistema de translação da tocha (denominado de Tartílope V4 ou simplesmente Tartílope) e a fixação da junta. Sendo assim, foi construído o conjunto apresentado na Figura 27 para auxiliar na realização de todos os testes de soldagem com tubo.

Este suporte é fixado através de seu flange em uma mesa posicionadora ESAB modelo TAP1 (para 1 tonelada). Essa mesa permite a movimentação em três eixos (inclinação, rotação e elevação) facilitando o posicionamento e auxiliando na ergonomia do soldador (no caso da soldagem mecanizada). Para a movimentação do Tartílope foi construída uma cinta a partir de uma chapa de 3/8" calandrada e soldada. Para garantir a concentricidade desta cinta com o suporte, além da cilíndricidade necessária para que

durante sua movimentação o Tartílope não altere o valor da DBCP, o conjunto suporte/cinta foi levado ao torno. A cinta foi torneada (externa e internamente) sobre o suporte e ao final do processo sua espessura caiu para 1/4". Ao montar o Tartílope nesta cinta, garante-se que durante seu movimento, nenhuma alteração de DBCP ocorrerá em virtude da cinta. É claro que ela não é o único elemento a influir neste parâmetro. A própria rigidez do Tartílope discutida por Magalhães (2012), Nascimento (2015) e Vargas (2013), além do desvio de circularidade admissível do tubo já representam alterações na DBCP.

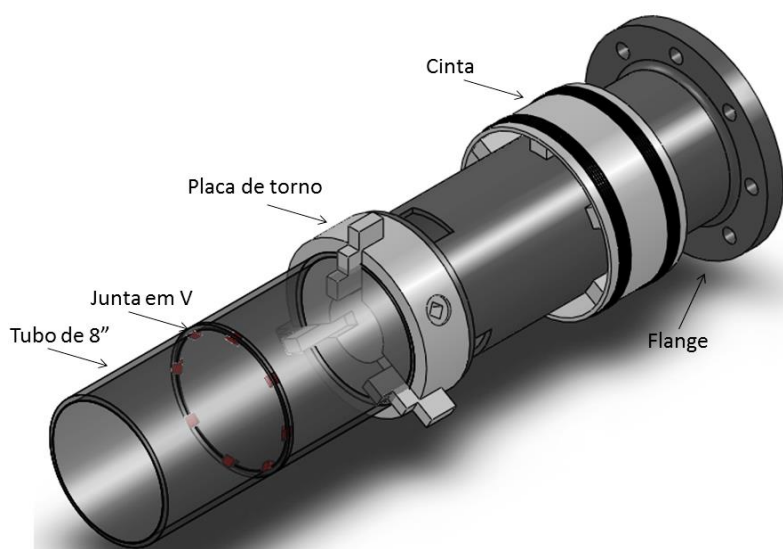


Figura 27. Suporte base para a realização de soldagem circunferencial

Na extremidade contrária a flange, pode-se visualizar uma placa de torno utilizada para fixar as juntas a serem soldadas concentricamente à cinta.

Em virtude de dificuldades já obtidas por Carvalho (2009) e Vargas (2013) dado o desalinhamento do eixo z com relação ao centro do tubo, foram realizadas intervenções para adequar o Tartílope a necessidade proposta. O eixo z do Tartílope se encontrava posicionado à frente do carrinho o que fazia com que sua movimentação não se desse na direção radial. Por este motivo, qualquer intervenção no eixo z durante a soldagem (para correção de DBCP, por exemplo) produzia um efeito de “puxar” ou “empurrar” a poça de soldagem. Com isso, foi feito um “extensor” de alumínio que permite posicionar a tocha de soldagem na direção radial ao tubo (Figura 28-b), embora o eixo z permaneça posicionado à frente do carrinho. Além disso, o motor (e todo aparato) que permitia o movimento rotacional da tocha foi eliminado a fim de evitar-se folgas. Além de melhorar a fixação da tocha no Tartílope, de sobra diminuiu-se o peso

sobre o eixo que fica em balanço. No entanto, o suporte ainda preserva a função de permitir a inclinação da tocha que agora se dá de forma manual. Isto não se torna um problema, uma vez que durante a soldagem não se faz alterações na inclinação da tocha. Nas versões subsequentes à desse Tartílope, a posição do eixo z já foi corrigido (Figura 28-c). Entretanto, como a versão disponível quando se iniciou os testes era a mostrada na Figura 28-a, foram necessárias estas intervenções.

Por fim, apresenta-se na Figura 29 uma imagem da bancada utilizada para a realização dos testes com tubo.

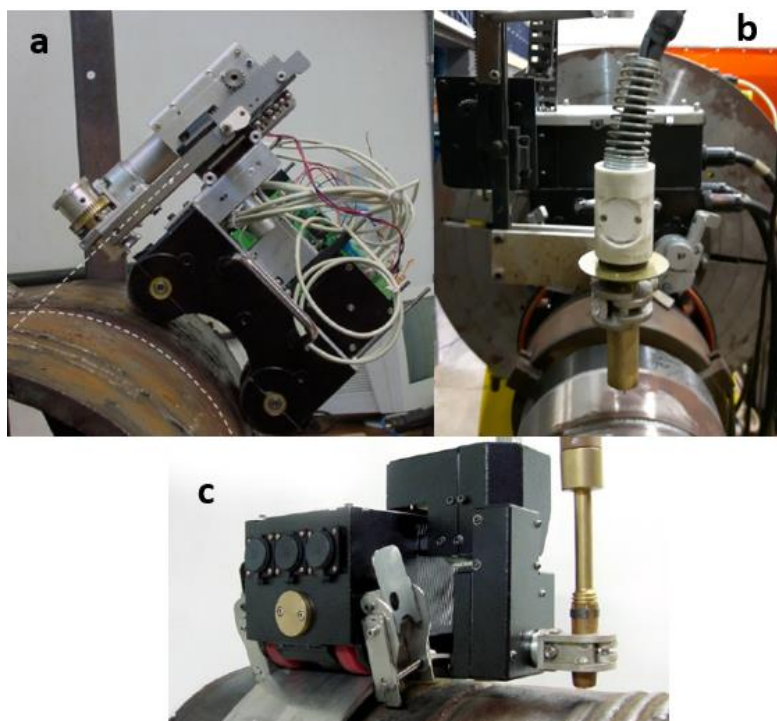


Figura 28. Posição do eixo z do Tartílope (a) na primeira versão, (b) na versão corrigida pelo autor e (c) na última versão do protótipo feita por CARVALHO (2009)





Figura 29. Bancada experimental utilizada para a soldagem de tubos

#### 4.3. Instrumentação

O monitoramento dos parâmetros tensão e corrente durante a realização dos ensaios foi realizado a partir do uso de uma placa de aquisição da National Instruments modelo NI USB-6009. Um programa desenvolvido em linguagem Labview® permitiu a interface gráfica, apresentando os sinais adquiridos a uma frequência selecionada de 5 kHz com a opção de salvá-los em formato texto para posterior análise e tratamento. O disparo do programa em Labview para iniciar a aquisição é feito junto com o gatilho do Tartilope. O Tartilope também é o responsável pelo disparo simultâneo da fonte de soldagem e do SVP (Sistema de Variação de Parâmetros). O sensor para leitura da corrente foi o de efeito Hall modelo HTA 600-S da marca LEM. Para leitura do sinal do sensor de efeito Hall e da tensão de soldagem foi utilizado um sistema condicionador de sinais elaborado por MACHADO et al. (2011) em conformidade com a ISO 17662 (2005). A leitura da velocidade de alimentação de arame foi feita por sistema próprio construído exclusivamente para este fim e será melhor comentado no Item 5.6.

#### 4.4. Sequência metodológica

Devido à grande quantidade de testes realizados e algumas tomadas de decisão que foram feitas ao longo da realização destes, apresenta-se a seguir um fluxograma exemplificando a sequência metodológica dos testes adotada (Figura 30).

No topo do fluxograma, tem-se os resultados obtidos por Magalhães (2012) para o passe de raiz. Os envelopes operacionais levantados para os quatro processos (STT, CMT, RMD e CONV) foram obtidos a partir da soldagem em chapa com o auxílio do SSDR. Entretanto, faz-se necessário validar estes parâmetros obtidos na soldagem em tubos.

Para a validação destes resultados, ora obtidos em chapas, mas agora realizados em tubos, foram utilizadas as condições centrais de cada envelope para cada processo com a mistura  $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ , sem o uso de Hi/Low (desalinhamento). Observa-se na Figura 31 que somente esta situação apresenta condições adequadas aos quatros processos.

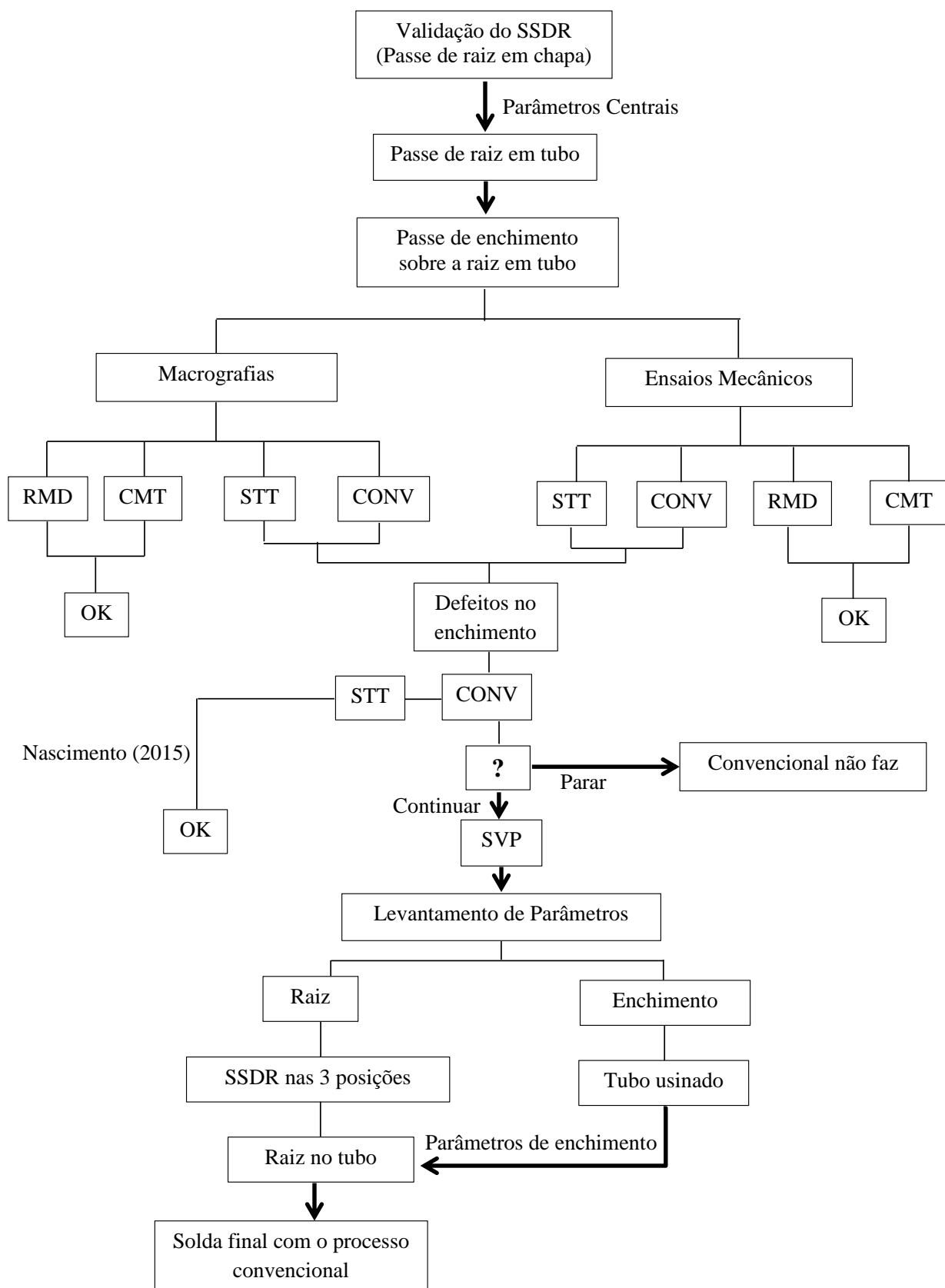


Figura 30. Fluxograma da sequência metodológica

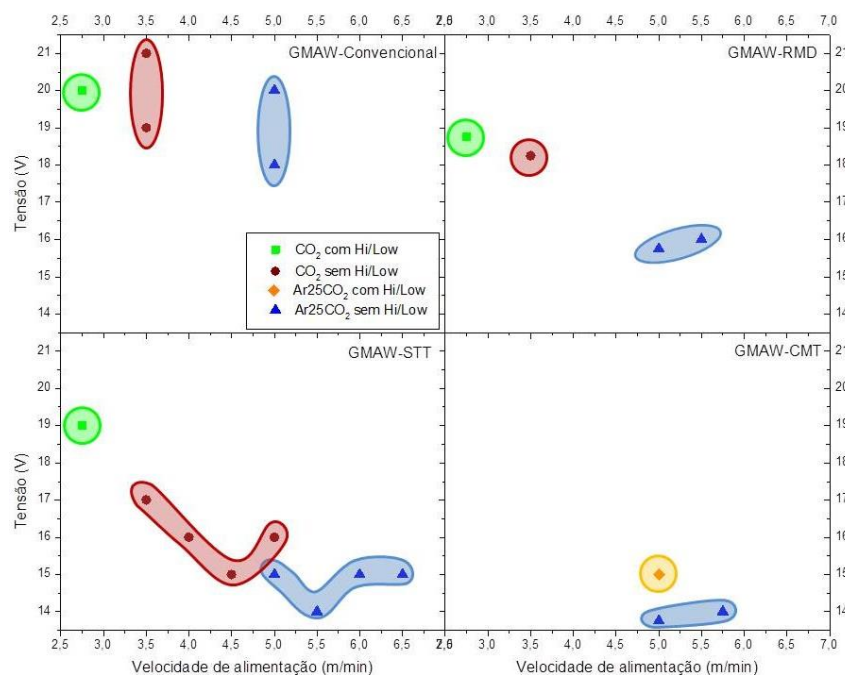


Figura 31. Condições paramétricas para o passe de raiz obtidos a partir do SS DR por MAGALHÃES (2012)

Neste sentido, a Tabela 3 traz as condições levantadas para a validação do passe de raiz em tubos. A distância do bico de contato à peça (DBCP) foi 18 mm para todos os processos.

Tabela 3. Parâmetros de soldagem para o passe de raiz em tubos

Processo	Velocidade de alimentação [m/min]	Velocidade de soldagem [cm/min]	Freq. tecimento [Hz]	Parâmetros característicos
CONV	5,00	31,0	3,2	Tensão=19,0 V; Indut.=40%
STT	5,75	35,0	3,6	Ip=350A; Ib=130A; Tailout=10
RMD	5,20	32,0	3,3	Trim=75; ArcControl=25
CMT	5,20 (ajustado 5,70)*	35,0	3,0	CompArco=25; Cont.Din.=2,5

\* Destaca-se que para o CMT deve-se atentar ao fato de que existe uma diferença entre o valor ajustado na fonte (neste caso 5,70 m/min) e aquele mensurado (5,20 m/min neste caso).

Uma vez realizadas as soldas com o conjunto de parâmetros definidos na Tabela 3, partiu-se para a realização do passe de enchimento.

Inicialmente foi proposta a utilização de duas misturas gasosas, assim como avaliado nos passes de raiz: Ar+25%CO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> puro, que são normalmente utilizadas para a transferência metálica por curto-circuito. Entretanto, em testes preliminares não

foi possível obter uma condição robusta para o gás CO<sub>2</sub> puro, pois a tendência ao escorrimento na posição vertical descendente foi muito alta (Figura 32). Assim, somente a mistura Ar+25%CO<sub>2</sub> foi avaliada.

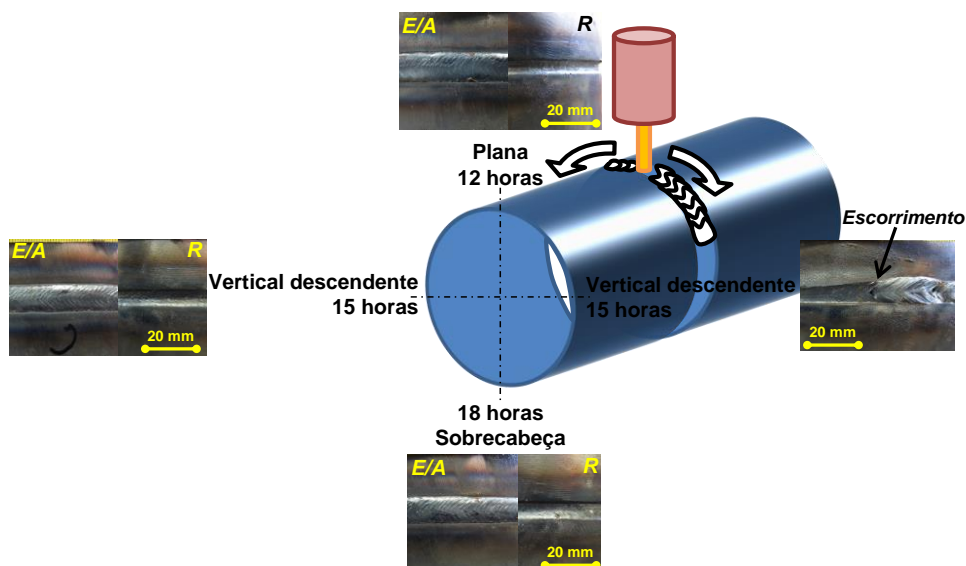


Figura 32. Posições de soldagem e detalhe superficial dos cordões, demonstrando o escorrimento da posição 15 horas e aspecto superficial dos cordões em ambos os passes (E/A – Enchimento/Acabamento e R – Raiz)

Neste mesmo contexto, foi proposta a utilização de transferência metálica por voo livre durante o enchimento da junta. Entretanto, o mesmo escorrimento foi notado para ambos os gases na posição vertical descendente. Desta forma, somente a transferência por curto-circuito foi utilizada, tanto na modalidade convencional quanto controlada (processos derivativos). Reforça-se que o escorrimento geralmente ocorre na posição vertical e impede que solda seja completada com sucesso, mesmo que na plana ou sobrecabeça tenha dado certo. Este fato reforça a ideia de se ajustar o melhor parâmetro possível para cada posição de soldagem com a finalidade de se ter uma solda adequada como um todo.

Em seguida, como forma de facilitar a execução de soldagens de campo, cada junta soldada foi executada com o mesmo processo/fonte, ou seja, para o processo GMAW convencional, tanto a raiz, quanto o enchimento foram feitos com este processo. Para o STT, tanto a raiz, quanto o enchimento também foram feitos somente com este processo, e assim por diante. Destaca-se que é possível soldar uma junta

alterando-se os processos entre raiz e enchimento, por exemplo, executando-se a raiz com RMD e o enchimento com CMT.

Todos os passes de enchimento realizados nesta etapa foram realizados sobre uma raiz soldada. Ou seja, para cada solda de enchimento, foi necessário soldar uma raiz para servir como um “corpo de solda”. Isto dificultou muito os ensaios e tomou muito tempo para a realização de todos os testes. Com isto, pensou-se em construir a junta usinada da Figura 23, mas que somente foi utilizada para o levantamento de parâmetros de enchimento a serem utilizados no sistema com variação de parâmetros.

A Tabela 4 traz os parâmetros de soldagem obtidos para a execução do passe subsequente (revestimento/enchimento). Estes parâmetros levantados a partir do envelope operacional obtido para o passe de raiz e também na experiência absorvida em utilizar estes processos conhecendo a influência (no cordão) de cada um dos parâmetros regulados, especialmente aqueles que definem os processos derivativos.

Tabela 4. Parâmetros ajustados para o passe de enchimento/acabamento

Processo	Velocidade de alimentação [m/min]	Velocidade de soldagem [cm/min]	Freq. tecimento [Hz]	Parâmetros característicos
CONV	3,50	21,0	3,2	Tensão=18,0 V; Indut.=40%
STT	4,00	24,0	3,6	Ip=320A; Ib=100A; Tailout= 8
RMD	4,00	24,0	2,5	Trim=50; ArcControl=25
CMT	4,00 (ajustado 6,00)*	20,0	2,2	CompArco=25; Cont.Din.=2,5

\* Destaca-se que para o CMT deve-se atentar ao fato de que existe uma diferença entre o valor ajustado na fonte (neste caso 6,00 m/min) e aquele mensurado (4,00 m/min neste caso).

Destaca-se mais uma vez que a maior limitação para imposição de maiores valores de velocidade de alimentação/corrente foi o escorrimento da poça na posição 3 horas (vertical descendente). A distância do bico de contato à peça (DBCP), diferentemente da raiz (18 mm) foi mantido em 12 mm para todos os processos, a fim de se segurar mais a poça evitando o escorrimento.

Depois de realizadas as soldas de raiz e enchimento em juntas tubulares, a fim de avaliar a integridade dessas soldas, todos os ensaios mecânicos previstos na norma API 1104 (2010) foram realizados. Os corpos de prova (CP) foram retirados dos tubos soldados conforme a mesma norma (Figura 33).

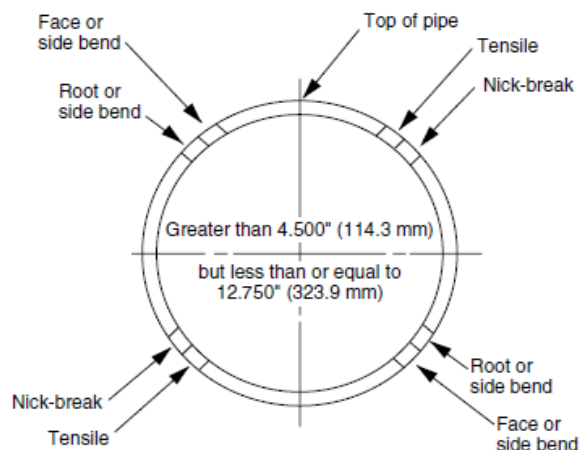


Figura 33. Posição de retirada dos corpos de prova (API1104, 2010)

A Tabela 5 apresenta além dos ensaios mecânicos realizados, um ensaio de metalografia para as quatro variações do processo GMAW avaliados (convencional, STT, RMD e CMT).

Tabela 5. Ensaios mecânicos executados e suas respectivas quantidades e localizações

Ensaio	Quantidade de Corpos de Prova (CP)
Metalografia	3 CP's, um para cada posição: 12 horas, 15 horas e 18 horas
Dureza	3 CP's, um para cada posição: 12 horas, 15 horas e 18 horas
Tração uniaxial	2 CP's prismáticos transversais a solda
Dobramento	4 CP's: 2 de face e 2 de raiz
<i>Nick Break</i>	2 CP's: um em cada quadrante
Charpy	3 CP's no quadrante superior e 3 CP's no quadrante inferior

Nos ensaios mecânicos, as soldas dos processos RMD e CMT foram consideradas adequadas. Entretanto, tanto o STT como o convencional apresentaram problemas relacionados a falta de fusão no passe de enchimento. Esses problemas puderam ser visualizados nos ensaios mecânicos e também no macrográfico.

Analizando o caso do processo STT, seria realizado um novo esforço no tocante a um levantamento de parâmetros mais adequados e que produzissem um cordão de enchimento livre de discontinuidades. No entanto, paralelamente a este trabalho, Nascimento (2015) soldou a mesma junta em tubo com o processo STT e conseguiu obter bons resultados. Sendo assim, não haveria sentido em buscar a melhoria de um envelope operacional já otimizado. Com isso, apesar de neste trabalho não se ter obtido condições adequadas à soldagem com o STT, considera-se que diante dos resultados

obtidos por Nascimento (2015), este processo consegue realizar a soldagem da junta proposta com sucesso.

Por outro lado, para o processo convencional, mesmo após a realização de diversos testes semelhantes ao realizados neste trabalho, Nascimento (2015) também não conseguiu ajustar este processo para a realização de um cordão de enchimento adequado. Como diversos teste já haviam sido realizados e, para os ensaios mecânicos/macrográfico foi escolhido o melhor cordão, chegou-se a uma indefinição. Se diversos testes já foram realizados e o processo convencional com a melhor condição paramétrica obtida não obteve sucesso, é de se presumir que com este processo não se pode soldar esta junta.

Por outro lado, sabe-se que a falta de fusão se dá primordialmente em virtude da baixa corrente imposta. Uma vez que a corrente é um parâmetro dependente da velocidade de alimentação de arame, poder-se-ia pensar em aumentar este valor juntamente com a velocidade de soldagem (a fim de se manter a mesma área de seção transversal da solda). Entretanto, embora este aumento possa parecer favorável a posição plana, por exemplo, na vertical essa poça mais quente e, conseqüentemente mais fluida, poderia escorrer com maior facilidade. Percebe-se que um único conjunto de parâmetros limita muito a faixa operacional do processo. A única saída para se tentar achar um conjunto de parâmetros que ao serem ajustados produzam uma solda considerada adequada frente aos ensaios mecânicos/macrográfico é variar os parâmetros de soldagem de uma posição para outra. Decidiu-se assim pelo projeto e construção de um sistema que permita variar a tensão de soldagem e as velocidades de alimentação/soldagem em função da posição orbital da tocha. Este sistema é apresentado e melhor descrito no Item 5.

Variando-se os parâmetros entre as posições plana/vertical/sobrecabeça, é possível teoricamente soldar-se com a maior relação velocidade de alimentação/velocidade de soldagem possível. Com isso, utilizou-se o SSDR para o levantamento desses parâmetros soldando sobre chapa primeiramente na posição plana, em seguida na vertical e por fim, na sobrecabeça. A partir dos parâmetros obtidos com o SSDR, soldou-se em uma junta tubular e variou-se os parâmetros para as posições plana/vertical/sobrecabeça com auxílio de um sistema desenvolvido denominado de SVP (Sistema de Variação de Parâmetros para Soldagem Circunferencial), apresentado



no Item 5. Porém, a definição da faixa angular de transição entre os parâmetros foi obtida experimentalmente, em função da dificuldade já apontada na literatura (Item 3.2). Inclusive, as faixas angulares de transição para variação de parâmetros são diferentes para a raiz e enchimento como será mostrado no Capítulo 6.

Para o levantamento dos parâmetros limites do enchimento para cada posição de soldagem, utilizou-se o tubo usinado apresentado na Figura 23. Para a soldagem na posição plana, colocava-se o Tartílope na posição  $0^\circ$  e soldava-se até no máximo  $30^\circ$ . Em seguida, para a soldagem com outros parâmetros, voltava-se o Tartílope para a posição  $0^\circ$  e girava-se o tubo na placa de torno do suporte de  $30^\circ$  (para que o início da nova solda seja no fim da anterior). Assim, repetia-se este processo até que se determinasse o melhor conjunto de parâmetros possível (o objetivo foi sempre soldar-se mais rapidamente). O mesmo procedimento foi realizado para a vertical – soldou-se de  $80^\circ$  à  $110^\circ$  - e para a sobrecabeça – soldou-se de  $150^\circ$  à  $180^\circ$ .

Com os parâmetros de enchimento definidos para cada posição, partiu-se para a validação desses valores em uma junta tubular com o passe de raiz previamente executado.

Por fim, após ajustes e consequente obtenção de uma junta completamente soldada (raiz e enchimento), realizaram-se testes macrográficos para verificação se a solda está adequada ou não conforme os parâmetros da norma API. Uma vez que mesmo com falta de fusão a solda feita com o processo convencional sem variação de parâmetros conseguiu “passar” nos ensaios mecânicos, julgou-se desnecessário repetir estes testes para esta solda. Partiu-se do princípio de que se a solda for adequada através de uma análise macrográfica, ela conseguirá facilmente passar nos ensaios mecânicos.

## 5. SISTEMA DE VARIAÇÃO DE PARÂMETROS PARA SOLDAGEM CIRCUNFERENCIAL (SVP)

O sistema desenvolvido neste trabalho é capaz de variar os valores de tensão de soldagem e velocidade de alimentação de arame da fonte bem como a velocidade de soldagem (eixo x do Tartilope) em função da posição angular da tocha. Ou seja, o sistema é capaz de ler o sinal de um sensor de inclinação e então ajustar os valores das três saídas. Todo o conjunto do hardware para a execução dessa tarefa foi projetado e construído de forma bem segmentada como se pode ver no fluxograma da Figura 34.

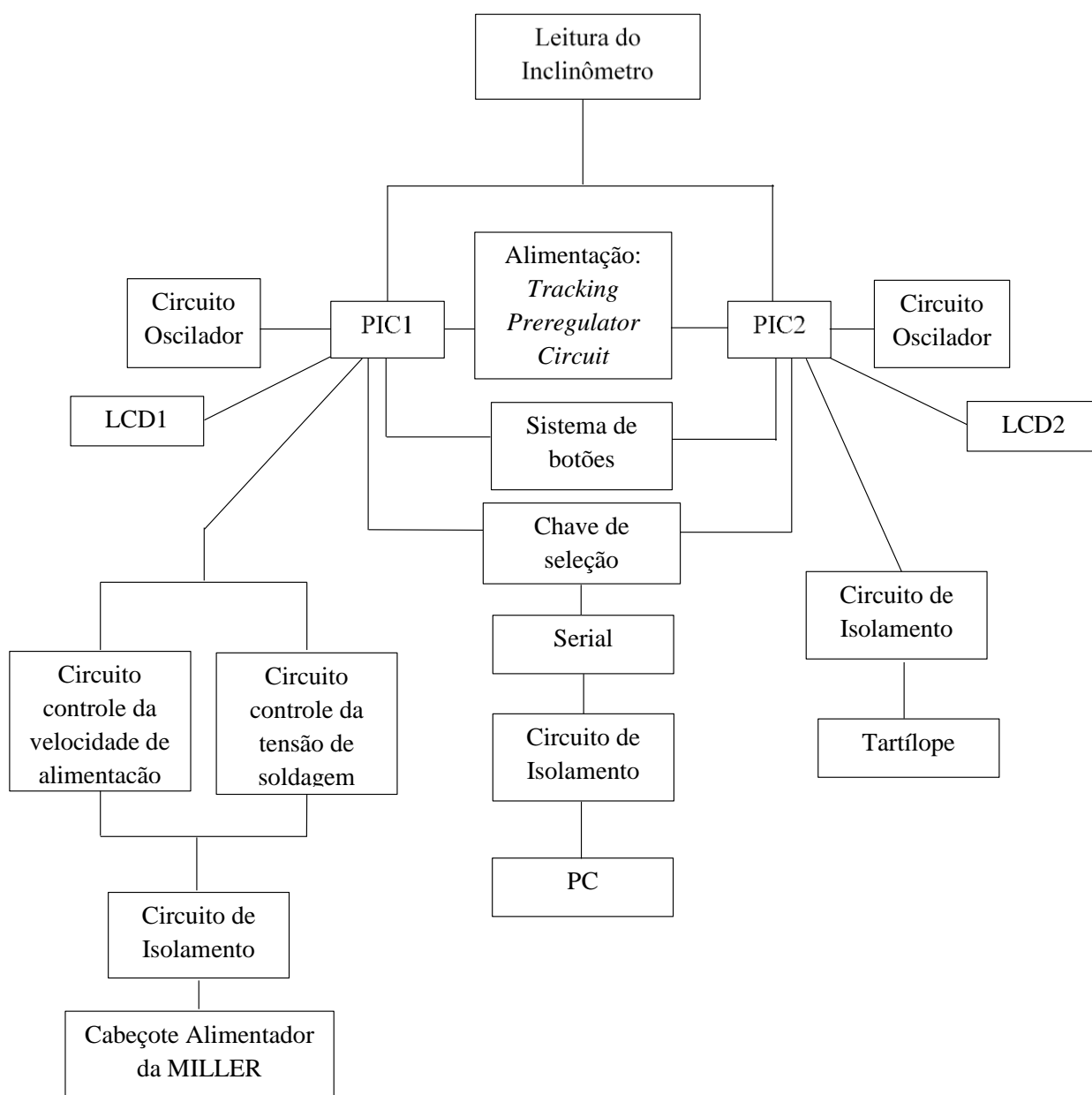


Figura 34. Fluxograma do hardware projetado (PIC1 e PIC2)

Ao longo desse capítulo serão explicados os esquemas elétricos projetados e construídos de cada parte que compõe o conjunto.

Destaca-se que a unidade de processamento para ler o ângulo e produzir o sinal de controle para variação da tensão/velocidade de alimentação pode ir desde um simples microcontrolador até um avançado Controlador Lógico Programável (CLP). O circuito proposto neste trabalho não tem o intuito de ser o melhor e nem o mais otimizado para realizar a tarefa proposta. Contudo os circuitos a serem apresentados atendem a necessidade do projeto operando com boa repetitividade e confiança.

Para a leitura/aquisição da velocidade de alimentação de arame foi utilizado um terceiro PIC que através de uma comunicação serial envia os valores lidos à um computador. O fluxograma a seguir exemplifica a lógica do circuito (Figura 35).

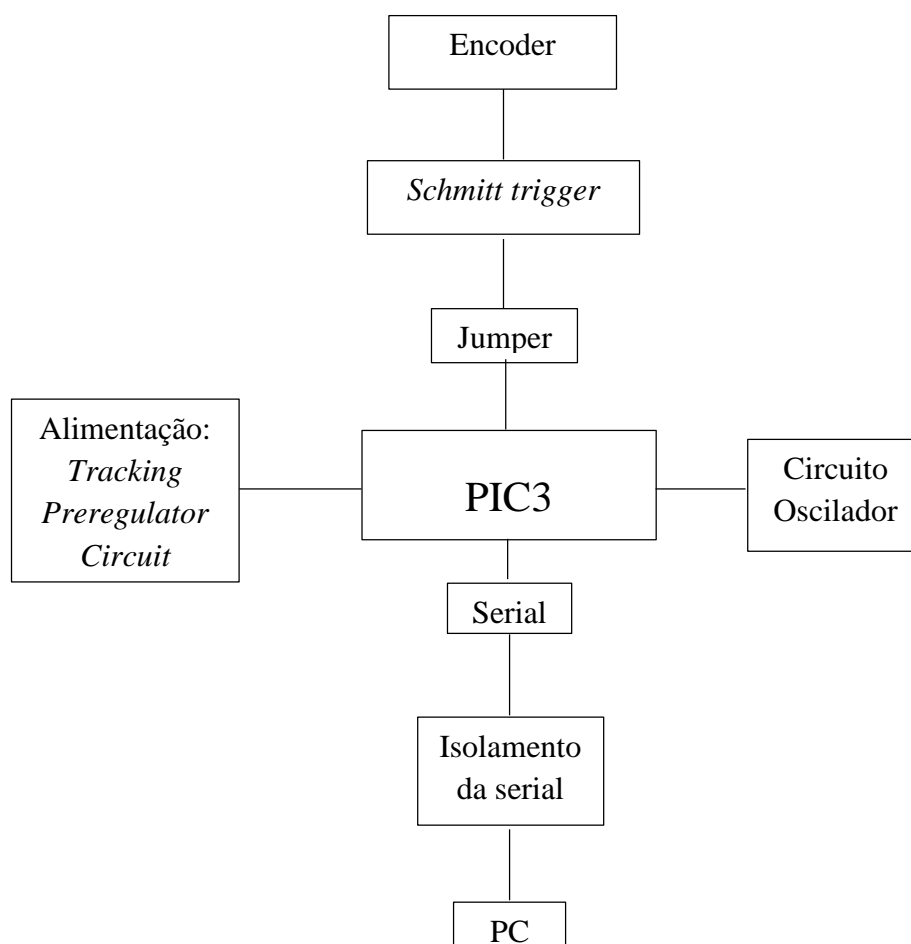


Figura 35. Fluxograma do *hardware* projetado (PIC3)

Foram utilizados ao todo três microcontroladores PIC da família 16F877A. O primeiro é responsável por fazer o controle da tensão/velocidade de alimentação de arame de soldagem; o segundo é responsável por controlar a velocidade de soldagem (deslocamento do “carrinho” orbital); e o terceiro é responsável por fazer uma leitura da velocidade de alimentação de arame.

### **5.1. Alterações para controle externo na fonte da Miller**

Todos os testes realizados para o processo convencional foram feitos utilizando-se a fonte da Miller. Embora o GMAW convencional deva ser fundamentalmente o mesmo processo independentemente da marca/modelo da fonte de soldagem, a fim de se eliminar qualquer variável relacionada a fonte, utilizou-se novamente a MILLER para os testes com a variação dos parâmetros. Sendo assim, fez-se necessário buscar uma forma de atuar remotamente na fonte de soldagem. Ou seja, tanto a velocidade de alimentação como a tensão de soldagem devem ser variadas durante a soldagem por um sistema externo de acordo com a necessidade da posição de soldagem (plana, vertical ou sobrecabeça).

Ressalta-se que foi necessário “desvendar” como intervir eletronicamente na velocidade de alimentação e na tensão da fonte de soldagem. Além das dificuldades inerentes ao projeto de circuitos eletrônicos, ainda havia a necessidade de construção, calibração e posterior validação do protótipo do SVP.

Para se conseguir variar os parâmetros da fonte, primeiramente deve-se saber se tal fonte permite a variação dos seus parâmetros (velocidade de alimentação de arame e tensão) no decorrer da soldagem. Para isso, realizou-se uma soldagem qualquer com um determinado conjunto de parâmetros pré-ajustados. Como se pode observar na Figura 36, no cabeçote Alimentador de Arame PipePro Dual DX existe apenas um botão de ajuste (*knob*) (8) para ajuste de valores (girando no sentido horário incrementa-se o valor; girando-se no sentido anti-horário decrementa-se o valor).

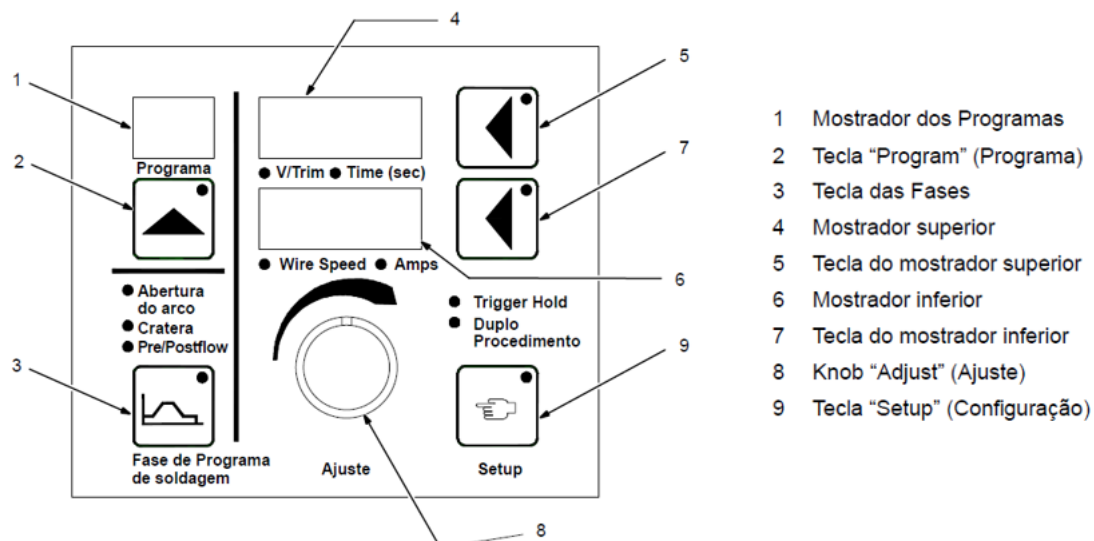


Figura 36. Menu auxiliar do cabeçote Alimentador de Arame PipePro Dual DX (adaptado de (MILLER, 2009))

Este único botão de ajuste (*knob*) incrementa/decrementa os valores da tensão de soldagem quando a tecla do mostrador superior (5) é pressionada e consequentemente o led indicador do acionamento dessa tecla é acesa. Da mesma forma, caso a tecla do mostrador inferior (7) seja pressionada, seu led se acenderá e ao se girar o botão de ajuste o valor de velocidade de alimentação será ajustado. Com isso, durante essa soldagem primeiramente pressionou-se a tecla da tensão (5) e variou-se o botão de ajuste no sentido horário e anti-horário. Em seguida (mas ainda durante a soldagem), pressionou-se a tecla da velocidade de alimentação (7) e da mesma forma variou-se o botão de ajuste. Pode-se observar que a medida que o botão de ajuste para a tensão ia sendo variado, o valor de tensão pré-ajustado também variava. O valor de tensão podia ser lido no mostrador superior. Igualmente, à medida que se variava o botão de ajuste para a velocidade de alimentação, o parâmetro inicialmente ajustado também ia sendo variado e podia ser visualizado no mostrador inferior (6). Sabe-se que a velocidade com que estes parâmetros são variados dependem não somente da velocidade de giro no, mas também da característica dinâmica da fonte. A partir da menor variação de um valor de tensão, por exemplo, a fonte busca dentro dos limites de resposta de seus componentes eletrônicos internos ajustar o novo valor. Mais à frente no decorrer do trabalho esse fato será melhor exemplificado. Essa primeira avaliação foi importante para saber que essa

fonte permite a variação de seus valores durante o processo de soldagem. Restava saber como.

Ao avaliar o painel frontal da fonte PipePro 450 RFC (Figura 37) pode-se observar uma disposição de teclas levemente parecidas com o painel frontal do cabeçote (Figura 36). Entretanto, do lado direito observa-se 2 conectores DB9: um é a porta PDA e o outro é a porta PC.

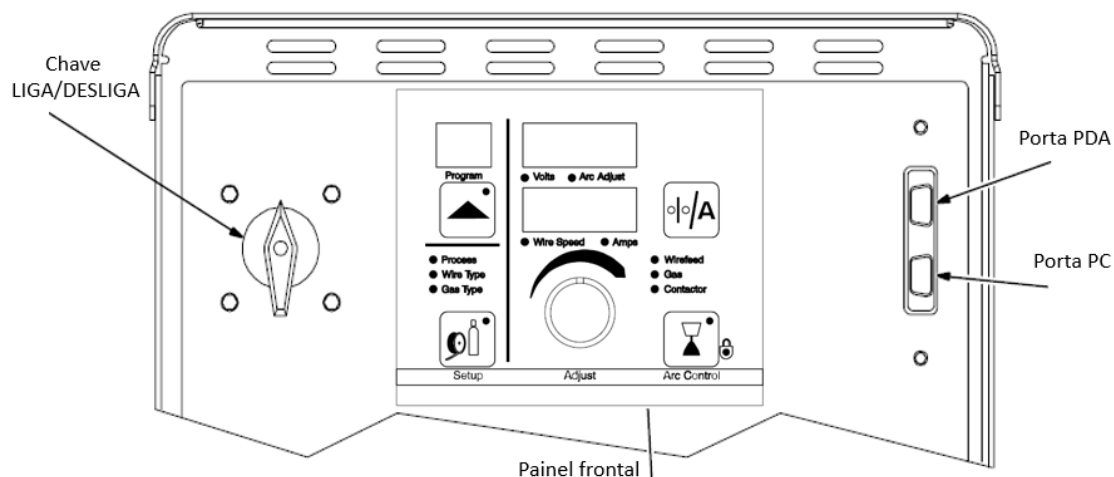


Figura 37. Painel frontal da fonte PiPePro 450 RFC (adaptado de (MILLER, 2008))

A porta PDA serve para conectar um *Personal Digital Assistant (PDA)* que possui um software próprio e fechado intitulado *PipePro Program Management (PipeProMgr)*. O PDA permite a criação de programas nos quais os parâmetros já sejam salvos. Pode-se por exemplo, criar um programa cujos parâmetros sejam próprios para passe de raiz e outro para enchimento. Entretanto o PDA também permite que sejam salvos os parâmetros com que cada solda foi realizada, a hora em que foi realizada e por qual soldador. Estes dados podem ser enviados por email para por exemplo compor relatórios (MILLER, 2005). Apesar dessa gama de funcionalidades, é inviável tentar variar os valores de tensão e velocidade de alimentação através do PDA. Primeiramente porque não se tem o equipamento disponível. Mas o ponto mais crítico consiste em ter de variar os parâmetros de acordo com uma entrada (posição angular dada pelo inclinômetro) e a partir dessa entrada variar os parâmetros com o PDA. Essa alternativa seria inviável para não se dizer impossível.

Já a entrada PC serve para ajuste nas configurações da máquina. Embora não se tenha muita informação disponível no manual da fonte sobre o que essa porta é capaz de fazer, em conversa com a assistência técnica da MILLER, os técnicos disseram que ela serve para reprogramação dos processadores, análise de erros e falhas. Com isso essa porta se torna sem serventia para a necessidade proposta.

Diante do fato de que as portas que se mostravam disponíveis e que poderiam sugerir uma saída mais fácil, não funcionam para o proposto, restou verificar a comunicação entre a fonte e o cabeçote. Tal comunicação é realizada por um cabo de 14 vias (Figura 38). Como se pode verificar na Figura 38, entre os pinos D e E há uma relação entre um sinal de controle de 0 à 10 Vcc para ajuste da tensão. Entre os pinos N e M também existe uma relação de 0 à 10 Vcc para ajuste da velocidade de alimentação.

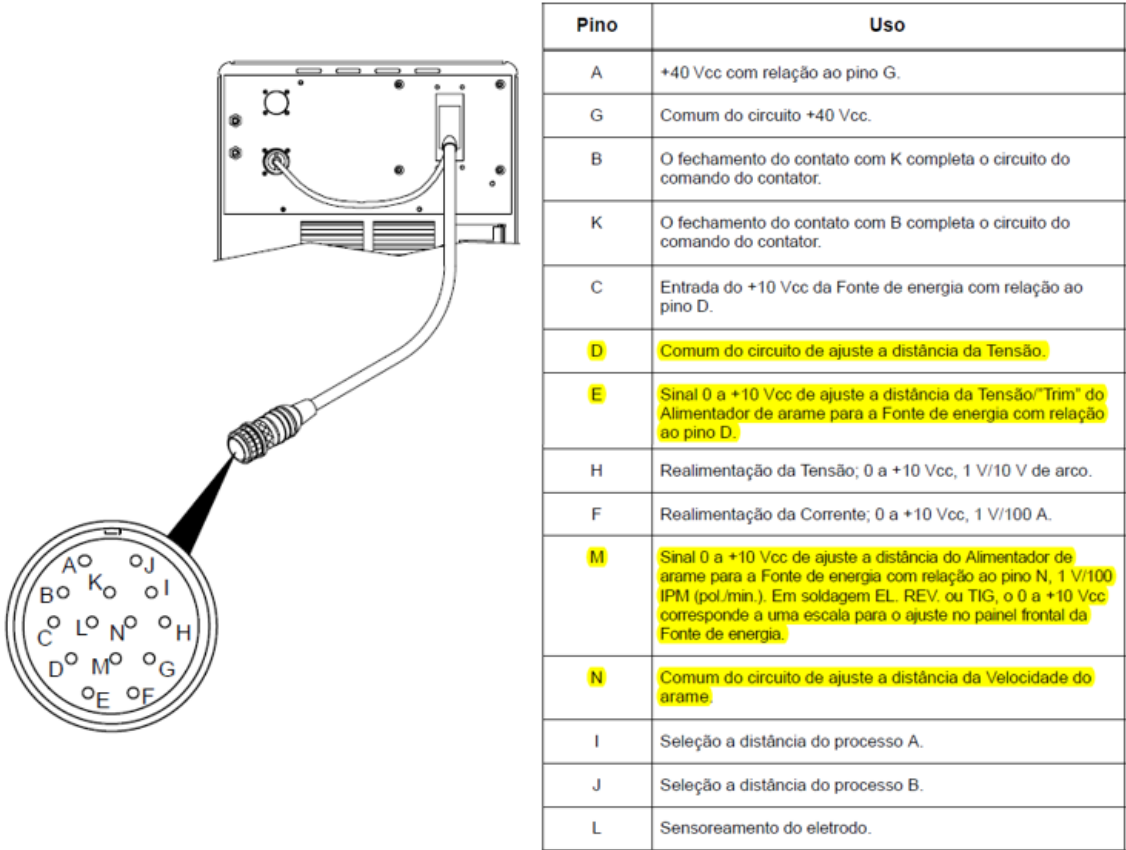


Figura 38. Soquete Remote 14 da fonte PiPePro 450 RFC (MILLER, 2008)

Tomado conhecimento disso, foi confeccionada uma placa de circuito impresso em que se conectasse os pinos que vem da fonte e os que vão para o cabeçote (Figura 39). Essa placa permitiria ler os dados que vem da fonte e enviar outros ao cabeçote.

Essa placa seria nada mais que um *jumper* desse cabo de 14 vias, ou seja, funcionaria como um *by-pass*. Quando se desejasse alterar o sinal de comunicação entre a fonte e o cabeçote, bastava enviar um sinal externo.

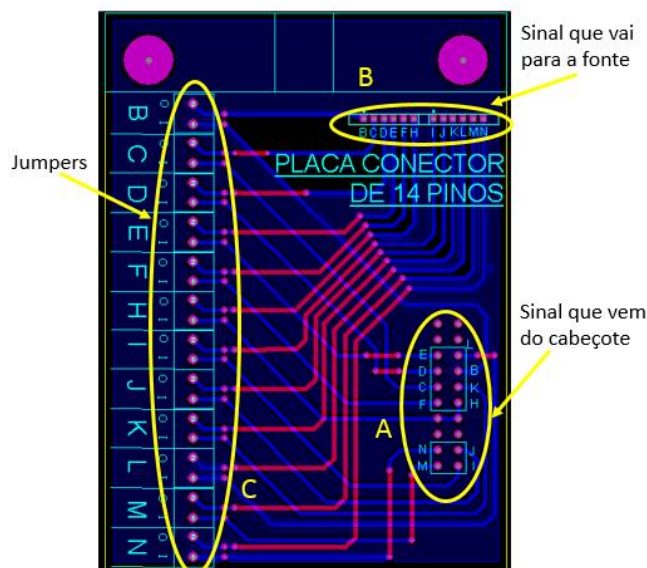


Figura 39. Placa de interligação

Na Figura 38, o conector *Remote 14* é o que interliga a fonte ao cabeçote. Entretanto, como este é um conector próprio e no padrão da MILLER torna-se difícil e caro de se encontrar. Todavia, depois que este cabo entra no cabeçote, este é conectado à placa interna do cabeçote por um conector mais simples semelhante aos utilizados em fontes ATX comerciais de computador e facilmente encontrado. Esse conector foi então desacoplado da placa do cabeçote e ligado ao conector indicado pela letra A na Figura 39. Assim, cada pino desse conector vai ao encontro de seu *jumper* correspondente (lado C da Figura 39). Nesta parte “C” da placa, é possível colocar um jumper e pegar o mesmo sinal que vem do cabeçote (A) e enviá-lo para a fonte (B), ou mesmo ler através de um osciloscópio o sinal que vem de “A” (*in*) e enviar outro externo para “B” (*out*). Na placa da Figura 39, no lado “C” é possível encontrar todos os pinos que vem do conector *Remote 14*, à exceção do pino A e G. Esses pinos são os de alimentação do cabeçote (40 Vcc) e não seria de interesse analisá-lo. A Figura 40 mostra esquema de como a placa da Figura 39 foi inserida. Salienta-se que esta placa foi inserida neste cabo de 14 vias, mas depois que este adentra no cabeçote afim de se evitar de ter de usar outro conector *Remote 14*.



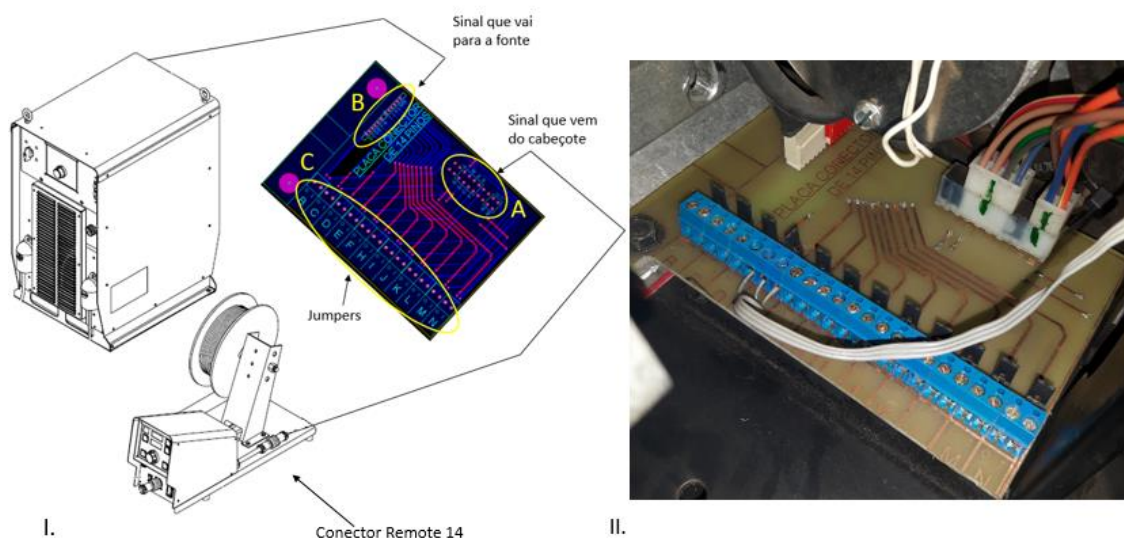


Figura 40. Esquema de ligação da placa entre o cabeçote e a fonte

Como já citado, o pino D é o pino comum do circuito de controle da tensão. Este pino foi ligado ao terra do osciloscópio. O pino E teve sua entrada (*in* – vem do cabeçote) e sua saída (*out* – vai pra fonte) curto-circuitados e ligados na ponta de prova. Com a fonte de soldagem/cabeçote ligados e com o *led* da tecla 5 da Figura 36 aceso (opção para o botão de ajuste variar a tenção de soldagem), ao variar-se o botão de ajuste com a indicação de tensão no visor de 10,3V à 44,5V o sinal no osciloscópio varia entre 0 e 10V. Ou seja, para se variar a tensão de soldagem de 10,3V à 44,5V, o sinal de controle no pino E deve variar entre 0 e 10V. Em seguida, o *jumper* foi retirado e foi utilizada uma fonte de alimentação externa de corrente contínua conectada entre o pino D e o pino  $E_{out}$ . Ao se variar a tensão na fonte externa, é possível ler a mesma variação no pino  $E_{in}$  embora não tenha alteração no visor. Inclusive, o visor relativo à tensão de soldagem fica travado em 10,3V. A priori, pensa-se que a tensão na fonte não variou. Mas ao apertar o gatilho, pode-se observar no visor a tensão pulando de 10,3V para a tensão correspondente a tensão de controle aplicada. Dessa forma, para a tensão está tudo resolvido. Para fazer variar a tensão de soldagem enquanto se solda, basta aplicar entre o pino D e o pino  $E_{out}$  um valor de tensão de controle que seja correspondente a tensão de soldagem desejada. Com isso, colocou-se uma chave de 2 posições para facilitar essa operação. Quando comutada para um lado, ela interliga os pinos  $E_{out}$  e  $E_{in}$  e a opera em seu funcionamento normal. Quando comutada para o outro lado, essa chave interliga o pino  $E_{out}$  ao pino externo que ditará a tensão de controle.

Preliminarmente, chegou-se a pensar que para a velocidade de alimentação seria a mesma metodologia a ser aplicada. Contudo ao se ler com o osciloscópio o sinal entre o pino N e o pino  $M_{in}$  (desconectado do  $M_{out}$ ) e variar-se o botão de ajuste do cabeçote, o sinal de tensão lido variava e o visor do cabeçote mostrava a velocidade de alimentação selecionada (correspondente). Entretanto, na fonte o mostrador ficava zerado. Ao se aplicar tensão a partir de uma fonte externa entre o comum (pino N) e os pinos  $M_{in}$  ou  $M_{out}$ , o visor do cabeçote variava, mas o da fonte continuava zerado. Ao se dar o gatilho na fonte, o visor do cabeçote também ia para zero. Ou seja, com certeza ao se abrir o circuito no pino M para tentar alterar a velocidade de alimentação a partir de um sinal de controle externo, a fonte não reconhece esse sinal externo e zera a velocidade de alimentação. Talvez por não estar com o circuito fechado (arco aberto) e não ter algum valor no pino F (*current feedback* – este pino ficava flutuando ao ser lido no osciloscópio), a fonte zerava o valor de velocidade de alimentação. Como o que se tentou fazer foi entender como a fonte comunica com o cabeçote e intervir na comunicação, obteve-se sucesso apenas para variar a tensão de soldagem, mas sem sucesso para a velocidade de alimentação.

Por outro lado, como já foi dito, é sabido que enquanto se está soldando é possível variar a velocidade de alimentação a partir da variação do botão de ajuste do cabeçote. Entretanto, para isso deve-se estar selecionada a tecla 7 da Figura 36. Na verdade, apesar de parecer um potenciômetro, este botão de ajuste gira um encoder óptico incremental da *Agilent Technologies* série HRP. Este encoder é alimentado com 5 Vdc e ao ser girado gera duas ondas quadradas (Ch\_a – canal A e Ch\_b – canal B) defasadas de 90°. Quando o Ch\_a está adiantado 90° em relação ao Ch\_b significa que o botão de ajuste está sendo girado no sentido horário e o valor de tensão/velocidade de alimentação (depende de qual estiver selecionado) estará sendo incrementado. Por outro lado, se o botão de ajuste for girado no sentido anti-horário, o Ch\_a estará atrasado de 90° em relação ao Ch\_b, e o valor de tensão/velocidade de alimentação estará sendo decrementado. Como o encoder é soldado na placa do painel (Figura 41), procurou-se no cabo que sai dessa placa para a de processamento quais eram os pinos correspondentes do encoder. Após encontrados, foi confeccionado um cabo semelhante, mas que era abreviado nos pinos do Ch\_a e Ch\_b. Foram colocadas duas chaves de seleção de duas posições (uma para o Ch\_a e outra para o Ch\_b) de forma que ao serem acionadas para um lado, a fonte funcionaria pelo botão de ajuste

normalmente. No entanto, ao ser comutada para o outro lado, o botão de ajuste seria desabilitado e os sinais dos Ch\_a e Ch\_b seriam enviados por um dispositivo externo. Colocando-se um gerador de sinais com duas ondas quadradas defasadas de 90°, podia-se verificar o valor da velocidade de alimentação/tensão aumentando ou diminuindo em função do Ch\_a e Ch\_b atrasado ou adiantado um em relação ao outro. Resumindo: com essa metodologia é possível variar a tensão ou a velocidade de alimentação de arame a partir de um trem de pulsos externo. Como a variação da tensão já foi possível através do circuito da Figura 40, essa alternativa será utilizada para alteração da velocidade de alimentação (já que não se obteve sucesso com a placa da Figura 39). E para isso, a tecla que seleciona a velocidade de alimentação deve estar selecionada.

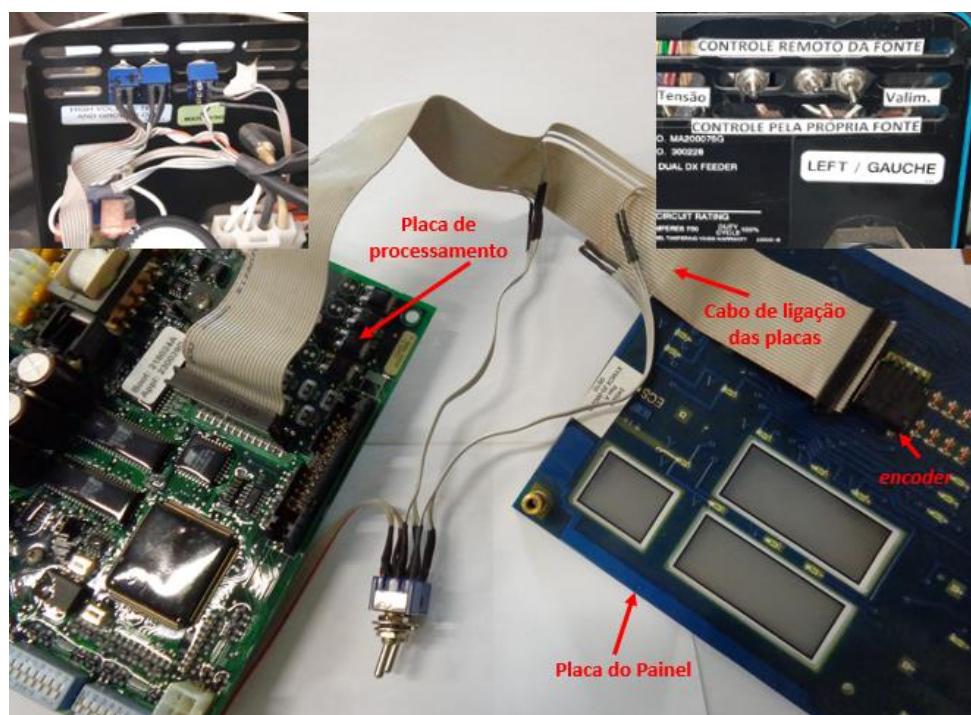


Figura 41. Cabo de ligação entre o encoder e a placa de processamento do cabeçote e chaves de seleção para controle externo ou pela própria fonte.

Pela Figura 41 pode-se observar que foram adicionadas as 3 chaves de seleção atrás do cabeçote da fonte. As duas da direita são para a velocidade de alimentação e a da esquerda para a tensão. Essas chaves são ligadas ao cabo que sai do cabeçote e é ligado ao sistema de faz a variação dos parâmetros.

## 5.2. Alterações para controle externo do Tartílope

No Tartílope, em seu funcionamento normal, são ajustados valores de velocidade de soldagem para o eixo x além de frequência e amplitude de tecimento para o eixo y. Finalizado os ajustes, aciona-se um botão de gatilho no controle e o carrinho orbital segue a trajetória conforme os parâmetros ajustados antes do disparo. Durante sua movimentação, é possível fazer intervenções manualmente no controle nos eixos y e z. Entretanto, o eixo x não permite alteração na velocidade durante sua movimentação. Uma vez que o equipamento foi desenvolvido e construído por terceiros, foi solicitada uma modificação no hardware do sistema de forma que o sinal enviado ao driver do motor x possa ser enviado tanto pelo próprio sistema do como por um sinal externo. O circuito da Figura 42 mostra a entrada externa para atuar na velocidade da soldagem do X durante o movimento de deslocamento. Para alterar é preciso selecionar uma chave colocada no painel frontal.

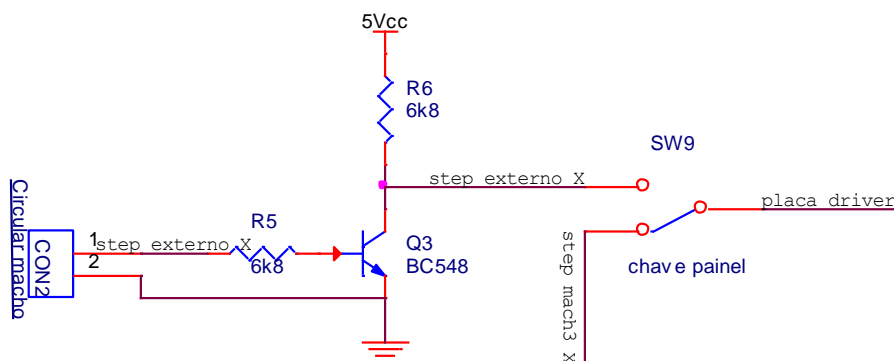


Figura 42. Esquema elétrico para sinal de clock externo no Tartílope

## 5.3. Sensor de inclinação

Um dos principais elementos do SPV é o sensor que mede a posição angular do carrinho e consequentemente da tocha de soldagem. Este sensor é importante pois é ele que ditará quais decisões o sistema deve tomar. Com isso, esse sensor deve ter uma boa resolução, além de uma boa estabilidade do sinal de saída.

Foi utilizado um inclinômetro da empresa global TURCK modelo B1N360V-Q20L60-2Li2-H1151 (Figura 43). Este inclinômetro incorpora um pêndulo micro mecânico, operando no princípio da tecnologia MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*). O pêndulo consiste basicamente de duas placas de eletrodos dispostos em paralelo com um dielétrico colocado no meio. Quando o sensor é inclinado, o dielétrico no meio se movimenta, fazendo com que a proporção da capacitância entre ambos eletrodos mude. Os circuitos eletrônicos integrados processam esse valor de capacitância e geram um sinal de saída correspondente.



Figura 43. Inclinômetro posicionado no Tartílope

A alimentação do sensor pode ser feita de 10 à 30 Vdc e a saída é representada na forma de uma corrente entre 4 e 20 mA. Este sensor foi escolhido dada sua grande robustez, já que tem tradição de ser usado em máquinas agrícolas, guindastes e máquinas perfuratrizes. Além do mais, a resolução de  $0.14^\circ$ , torna esse sensor muito convidativo ao uso em questão. Apesar de sua faixa de medição se estender de 0 a  $360^\circ$ , o sensor foi ajustado para operar entre 0 e  $180^\circ$  (já que a soldagem se resume a uma metade do tubo) e com isso consegue-se dobrar a sua resolução.

#### 5.4. Sistema para variar a Tensão de soldagem/velocidade de alimentação (PIC1)

Na Figura 44 está apresentado o circuito básico para o funcionamento de um microcontrolador. Os capacitores C1 e C2 aliados ao cristal X1 atuam como a base de tempo externa para o correto funcionamento do PIC.

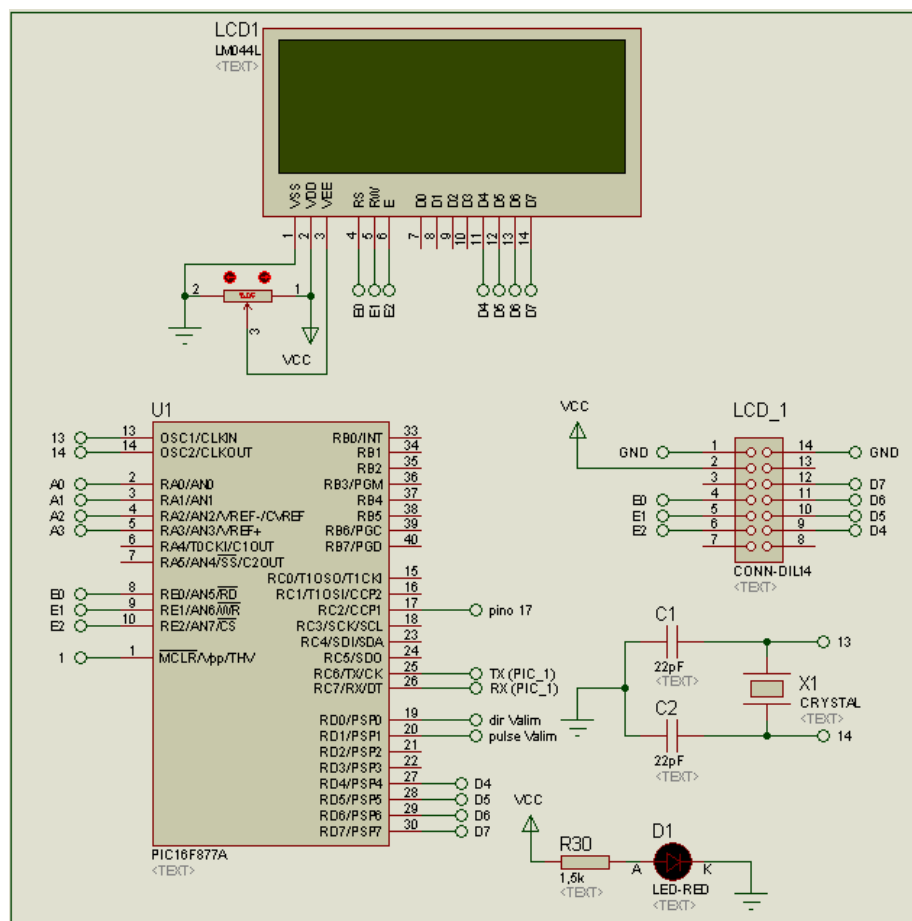


Figura 44. Circuito esquemático PIC1 (Valim e Ufonte)

O conector LCD\_1 representa o conector para ligação do PIC com o display LCD 20x4. O potenciômetro indicado no LCD1 serve para o ajuste do contraste do display. Observa-se que são utilizadas 4 entradas de A0 à A3. A Entrada A0 é a entrada analógica do sensor. Entretanto como comentado, a saída do inclinômetro é um sinal de corrente de 4 a 20 mA. Como o PIC em questão não consegue ler esse sinal de corrente, foi necessário colocar um resistor de 250Ω em paralelo à saída do sensor para que então



o microcontrolador pudesse ler a tensão aplicada sobre a resistência (Figura 45). Pela Lei de Ohm, para o sinal de saída do sensor variando entre 4 a 20 mA, a tensão lida sobre uma resistência de 250Ω variará entre 1 e 5 V, podendo ser perfeitamente lida pela entrada analógica do PIC. A alimentação do sensor foi feita a partir de uma fonte chaveada de +15V.

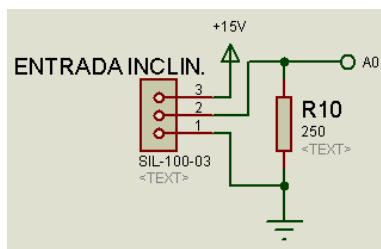


Figura 45. Circuito esquemático do resistor em paralelo na saída do inclinômetro

As entradas A1, A2 e A3 são utilizadas como entradas digitais para chaves de 2 posições Figura 46. A entrada A2 recebe GND quando a chave é comutada colocando o programa do sistema no modo manual. Da mesma forma, a entrada A2 também recebe GND quando é comutado o botão de “habilita disparo”. Por fim, quando o botão do gatilho está fechado, o pino A3 comuta para GND e o sistema é “disparado”. Cada uma dessas chaves quando desligadas enviam 5 V aos seus respectivos pinos.

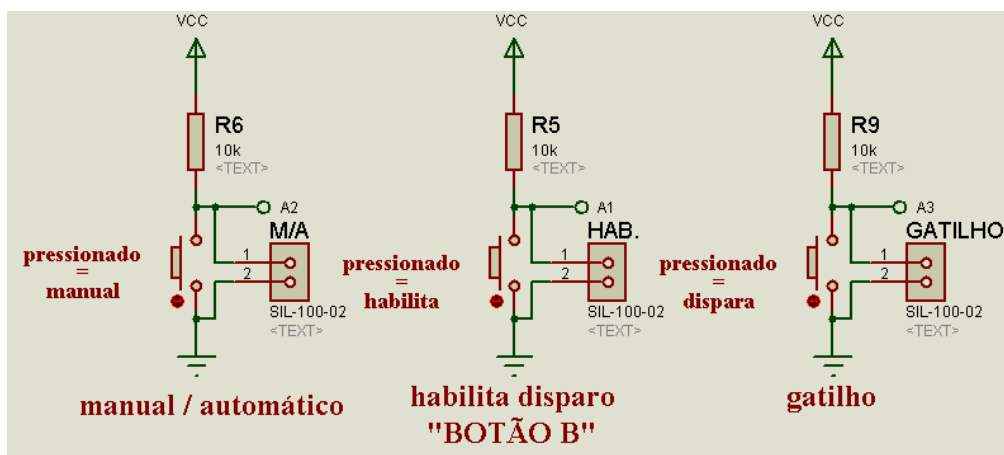


Figura 46. Circuito esquemático dos botões de acionamento

Na Figura 44 ainda é possível observar os pinos 25 e 26 responsáveis pela comunicação serial desse microcontrolador. Através desses pinos o programa inserido no PIC podia ser carregado sempre que houvesse necessidade de alterar algum

parâmetro de soldagem entre um ensaio ou outro. Nos pinos 19 e 20, pode-se observar duas saídas digitais intituladas “dir Valim” e “pulse Valim”. Essas saídas como sugere o nome são responsáveis por acionar um circuito (que será ainda comentado) que faz o ajuste da velocidade de alimentação de arame. Por fim, o pino 17 é responsável por acionar um circuito (que será ainda comentado) que faz o ajuste da tensão de soldagem.

Na Figura 47, está representado o circuito responsável por fazer a comunicação serial do PIC1 e PIC2. Ambos microcontroladores são regravados a cada parâmetro de soldagem alterado para a realização de uma soldagem. Com isso, para se facilitar esse processo de gravação, utiliza-se o circuito integrado MAX232 que faz a comunicação entre um PIC e uma porta serial. Como se grava um PIC por vez, foi elaborado apenas um circuito com a MAX232 e colocada uma chave comutadora para o circuito ora ficar disponível para a comunicação do PIC1 com a serial, e ora a comunicação ficar para o PIC2.

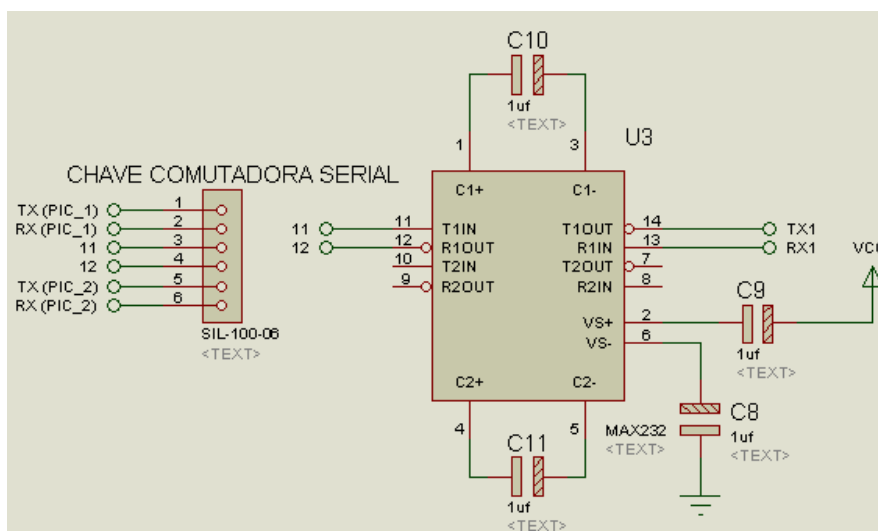


Figura 47. Circuito esquemático da MAX232 para o PIC1 e PIC2

Conforme comentado no item 5.1, para o controle externo da fonte de soldagem é necessária uma tensão de controle entre 0 e 10Vdc. Apesar do PIC16F877A não possuir nenhuma saída analógica, este possui duas saídas PWM (*Pulse-Width Modulation*). Sabe-se que ao ligar uma saída PWM a um circuito dotado de um filtro RC passa-baixa de segunda ordem passivo (ALTER, 2008), é possível tirar o nível DC desse sinal (MICROCHIP, 1997). Em uma onda quadrada de 0 a 5 Vdc, por exemplo, ao passá-la pelo filtro, tem-se um sinal DC de 2,5V, já que uma onda quadrada tem 50%



da onda em nível alto (5 Vdc) e 50% em nível baixo (GND). Como o próprio nome diz, um sinal modulado por largura de pulso (PWM) permite a variação da parte positiva da onda (nível alto) de 0 a 100%. Assim, a partir de uma saída PWM (pino 17 do PIC1) é possível obter-se uma saída analógica de 0 à 5 Vdc. Na Figura 48, pode-se observar que a saída do pino 17 do PIC1 (PWM) passa por um filtro RC e o nível DC do sinal entra no pino 3 do amplificador operacional 741.

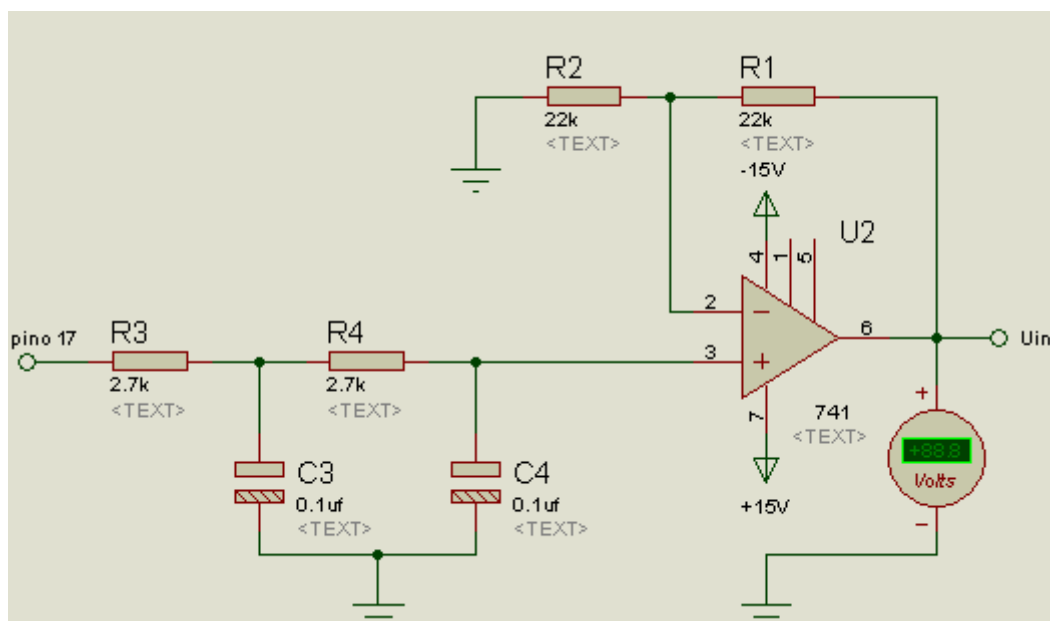


Figura 48. Circuito esquemático auxiliar para variação da tensão de soldagem

Como o sinal de controle para ajustar a tensão de soldagem na fonte da MILLER deve variar entre 0 e 10 Vdc, esse sinal que chega ao pino 3 do amplificador operacional 741 deve ser dobrado, já que somente pode variar entre 0 e 5 Vdc. Dessa forma, a ligação realizada para o 741 na Figura 48 é de um circuito dobrador de tensão. Após esse circuito, no terminal especificado por “Uin”, tem-se um sinal que pode variar entre 0 e 10 Vdc à medida que se varia a razão cíclica entre 0 e 100%.

Como dito anteriormente, os pinos 19 e 20 do PIC1 são duas saídas digitais intituladas “dir Valim” e “pulse Valim”. Diferentemente do sinal de controle para a tensão de soldagem que é analógico e deve ser enviado constantemente enquanto se estiver soldando, o sinal de controle para a variação da velocidade de alimentação é digital e somente deve ser enviado quando se desejar incrementar/decrementar o valor. Deve-se lembrar que este sistema estará funcionando como um encoder com dois canais de onda quadrada defasados de 90° um do outro, assim como o que originalmente é

acoplado ao botão de ajuste do cabeçote alimentador. Um circuito projetado para “simular” o funcionamento de um encoder é apresentado na Figura 49.

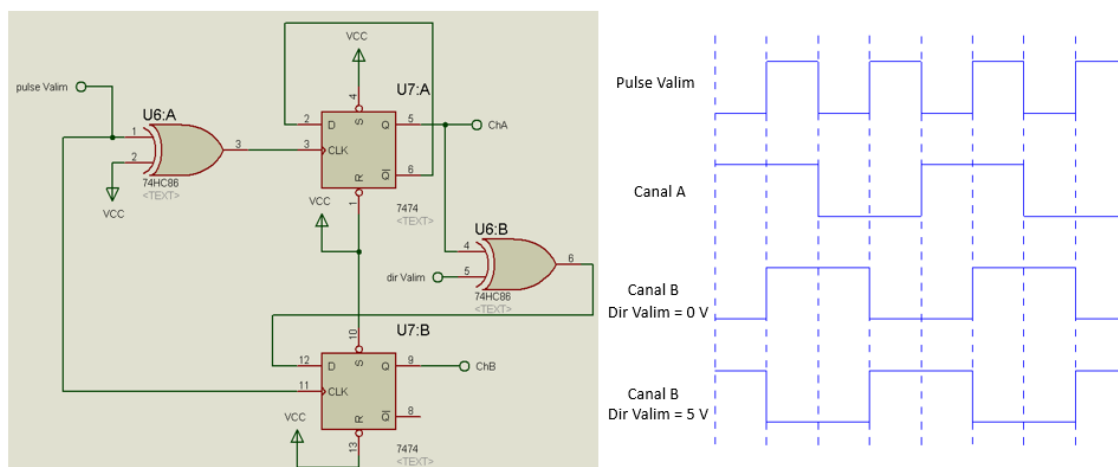


Figura 49. Circuito esquemático auxiliar para variação da velocidade de alimentação de arame

Neste circuito são utilizados 2 flip-flops do tipo D e duas portas XOR (ou exclusivo). Quando se deseja incrementar/decrementar a velocidade de alimentação de arame, uma sequência de pulsos é enviada pelo pino 20 do PIC1 (“pulse Valim”). Esse único pulso ao passar pelo circuito da Figura 49 dará origem a outros dois pulsos defasados de 90°, e com uma frequência 2 vezes menor. O que determinará qual sinal é adiantado em relação ao outro, é o outro pino “dir Valim”. Ou seja, para se alterar a velocidade de alimentação devem ser enviados o dobro de pulsos desejados (já que o circuito divide pela metade) e ainda selecionar se a saída do dir Valim será nível alto ou baixo, conforme se deseja aumentar ou diminuir a velocidade de alimentação.

O pino de saída do circuito da Figura 48 e os dois pinos de saída da Figura 49 (ChA e ChB) teoricamente já poderiam ser conectados ao circuito da fonte da Miller. Entretanto, para que eles funcionassem seria necessário conectar o terra (GND) do PIC1 aos terras analógico (circuito de tensão) e digital (circuito da velocidade de alimentação) do cabeçote. Além de acabar curto-circuitando os terras analógico e digital do circuito de controle do cabeçote da Miller, o que não é conveniente a vista eles serem distintos, caso ocorresse um eventual curto, ou mesmo mau funcionamento por parte do PIC1, os circuitos do cabeçote seriam afetados e consequentemente danificados. Por este motivo se faz necessário utilizar circuitos de proteção que façam o acionamento do cabeçote a partir do PIC1, mas sem que eles estejam conectados fisicamente. O circuito

apresentado na Figura 50, exemplifica o circuito utilizado tanto para ligação do sinal digital (velocidade de alimentação) como do sinal analógico (tensão de soldagem).

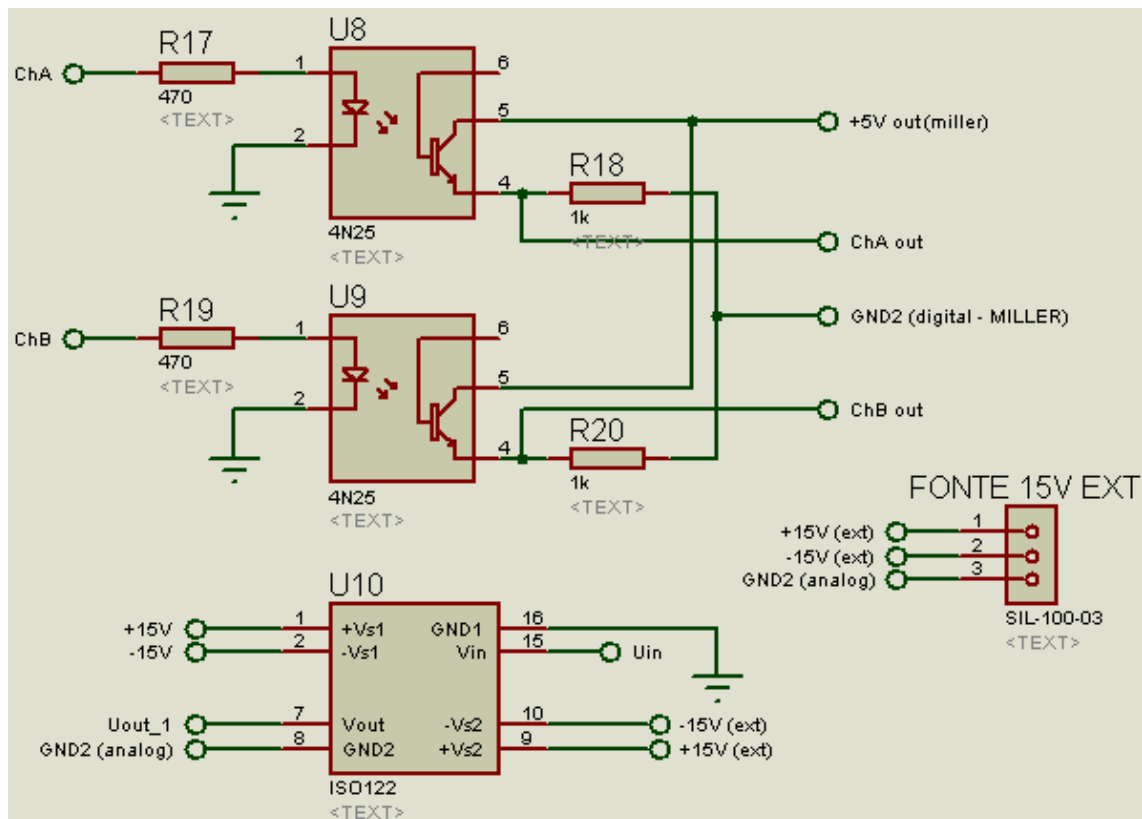


Figura 50. Circuito esquemático do circuito de proteção para ligação do PIC1 no cabeçote

Para o isolamento do sinal digital foram utilizados dois CI 4N25 (um para o ChA e outro para o ChB) que é um isolador óptico formado por um LED emissor e um foto-transistor. Quando sua entrada (pino 1) é excitada, ou seja, quando tem-se nível alto no canal A ou B, o led emissor aciona a base do foto-transistor fazendo com que a saída (pino 4) seja “igual” ao pino 5 que está ligado à uma outra fonte de 5V (esses 5V é tirado do próprio circuito digital do cabeçote; é esse sinal que alimenta o encoder HRPD-AD32 da Figura 41). Com isso, na saída também tem-se nível alto, entretanto, advindo de outra fonte de alimentação e portanto não estabelecendo nenhum contato “físico” entre o circuito acionador e o que é acionado. Observa-se que o terra ligado ao pino 2 dos circuitos U8 e U9 é distinto do “GND2 (digital – Miller)”.

Já para o isolamento do circuito de tensão, o CI 4N25 não pode ser utilizado, uma vez que sua saída ou é “zero” ou “um” (digital), sendo impossível varrer uma faixa entre esses valores. Assim, utilizou-se o ISO122 que é um CI isolador indicado para

sinais analógicos uma vez que sua saída é proporcional a entrada. Entretanto, esse CI exige uma alimentação simétrica (+15V e -15V) na entrada e na saída. Observa-se mais uma vez que o terra de entrada (pino 16) é distinto do terra de saída (pino 8) que é o terra ligado ao circuito analógico do cabeçote alimentador. Com isso, o circuito do PIC1 também fica desacoplado do circuito do cabeçote, e caso ocorra algum curto, apenas o ISO122 se danificará deixando o circuito do cabeçote intacto.

### **5.5.Sistema para variar velocidade de soldagem (PIC2)**

Para o acionamento externo do motor de movimentação do Tartílope (eixo x), foi utilizado um circuito com outro microcontrolador (PIC2). O circuito do PIC2 é idêntico ao do PIC1 e pode ser visualizado na Figura 51. Nele podem ser observados outro display LCD 20x4, além dos elementos básicos para o correto funcionamento do microcontrolador como o circuito oscilador (capacitores C5 e C6 com o cristal X2); conector de ligação com LCD; alimentação com led indicador de energia, além de uma fonte de 5V externa. No pino 2 do PIC2 (U15) é conectada a entrada A0 (Figura 45) que é o sinal do inclinômetro. Nos pinos de 3 a 5, também são conectadas a mesmas entradas que no PIC1, ou seja, os botões da Figura 46.

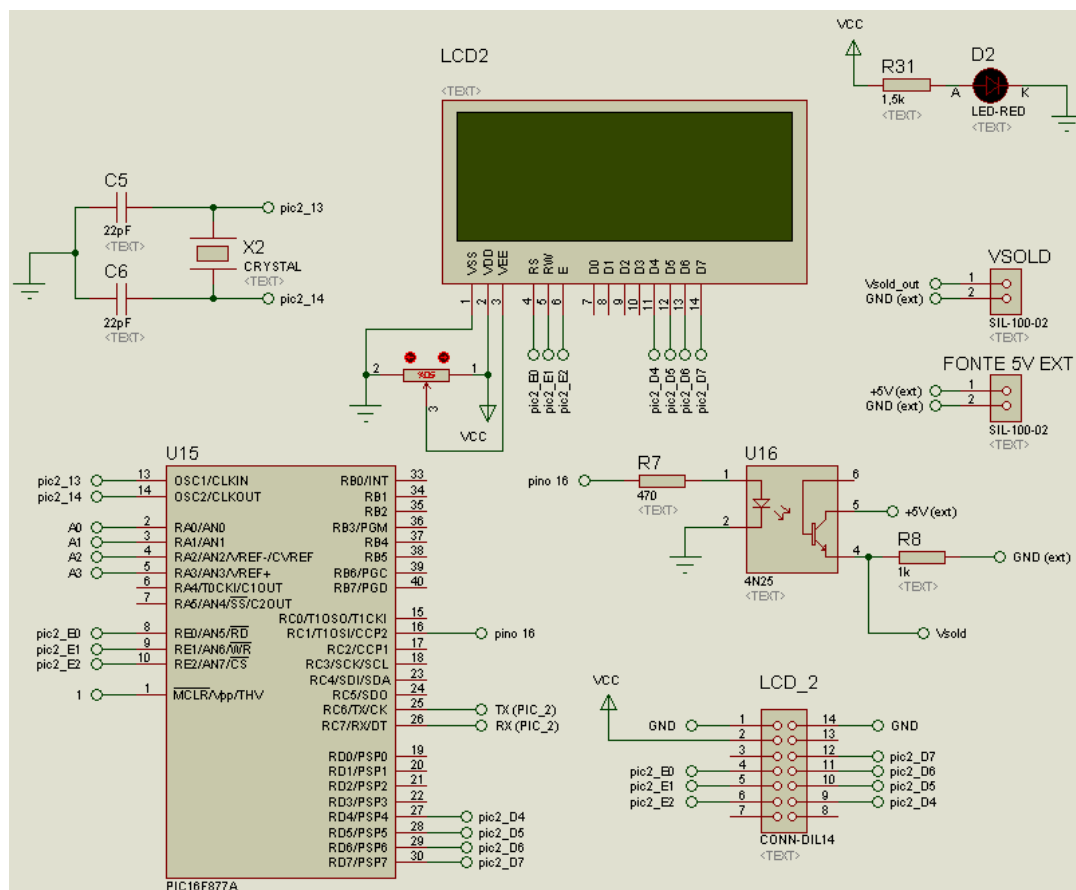


Figura 51. Circuito esquemático do PIC2 (Vsolid)

O pino 16 do PIC2 produz um sinal modulado em frequência (*PFM - Pulse-Frequency Modulation*) que é o sinal necessário para o acionamento do circuito do Tartilope (Figura 42). Diferentemente do *PWM*, o *PFM* varia a frequência do sinal e mantém a largura do pulso (a largura de pulso foi mantida em 50% em nível alto e 50% em nível baixo – onda quadrada). Para uma frequência menor enviada ao driver do motor x, o Tartilope se movimenta mais devagar. À medida que se aumenta a frequência desse sinal quadrado, o Tartilope aumenta sua velocidade.

Assim como explicado no circuito de acionamento do cabeçote, para o acionamento do Tartilope também se fez o uso do circuito de proteção com o CI 4N25. Mais uma vez esse circuito se fez necessário de forma a proteger o Tartilope de algum eventual problema no circuito do PIC2. O circuito com o 4N25 é exemplificado na Figura 51.

Afim de se evitar algum eventual ruído que pudesse acionar o eixo x do Tartilope sem que se desejasse, foi colocado na saída do pino 4 do 4N25 um relê. Esse

relê mostrado na Figura 52 somente é acionado quando se aperta o botão de gatilho do sistema e funciona não como uma proteção, mas como uma garantia que o sinal que deve ser enviado ao driver, somente o seja quando o gatilho estiver pressionado. Como o relê utilizado é de dois contatos independentes (duplo), foi possível também passar por ele o sinal de tensão enviado à fonte da Miller. Quando em gravação, o microcontrolador pode alterar o nível de saída de suas portas e com isso acionar o ISO122 e produzir uma tensão de controle no cabeçote. Dependendo da oscilação desse nível de tensão, caso ocorra algum problema e essa tensão ultrapasse 10 V, embora o ISO122 não queime (pois ainda suporta essa tensão na sua entrada), pode ocorrer algum dano ao sistema de controle do cabeçote que somente opera na faixa de 0-10 V. Neste caso, fazer o sinal de tensão passar pelo relê, consiste em uma proteção a mais afim de evitar danos ao cabeçote.

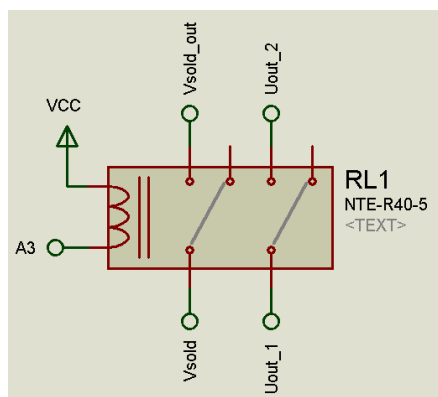


Figura 52. Relê acionado pelo gatilho

Os pulsos gerados para alterar a velocidade de alimentação não se fazem necessários passar por um relê pois, supondo o caso de envio incorreto/aleatório de pulsos, o que ocorreria seria apenas o display do cabeçote saturar na menor ou na maior velocidade de alimentação disponível. Seria o mesmo que girar o botão de ajuste (*knob*) diversas voltas mesmo quando o maior/menor valor já tenha sido alcançado para o ajuste da velocidade de alimentação de arame. É claro que traria um transtorno, uma vez que a soldagem se iniciaria com um valor de velocidade de alimentação maior ou menor acarretando em uma velocidade de alimentação diferente da especificada durante a soldagem. No entanto, embora a solda possa dar errado, o cabeçote não seria prejudicado.

### 5.6. Sistema para leitura da velocidade de alimentação (PIC3)

Como o sistema do PIC1 (Figura 44) faz a variação da velocidade de alimentação ao longo da soldagem, se faz necessário um sistema capaz de medir essa velocidade para saber se o sistema atuou de forma correta. É claro que a partir do sistema de aquisição de corrente, é possível se perceber o aumento/diminuição da velocidade de alimentação a partir do aumento/diminuição da corrente. Entretanto, avaliar em qual posição e como a velocidade de alimentação variou é importante. Com isso, foi utilizado mais um PIC 16F877A para realizar a tarefa de contar os pulsos de um encoder acoplado a uma das roldanas do cabeçote alimentador com o fim de medir a quantidade de arame alimentado por minuto.

O encoder da *Avago Technologies* modelo HEDM-5600 possui 1024 pulsos por revolução sendo alimentado por 5 Vdc. O encoder foi acoplado à uma das roldanas do cabeçote por um eixo de aço usinado de um lado no diâmetro do furo do sensor e do outro na medida do furo de centro da roldana (Figura 53). Neste último, entretanto, foi realizado um ajuste com interferência. Caso aja necessidade de se desmontar, basta realizar um pouco mais de força para retirar o eixo.

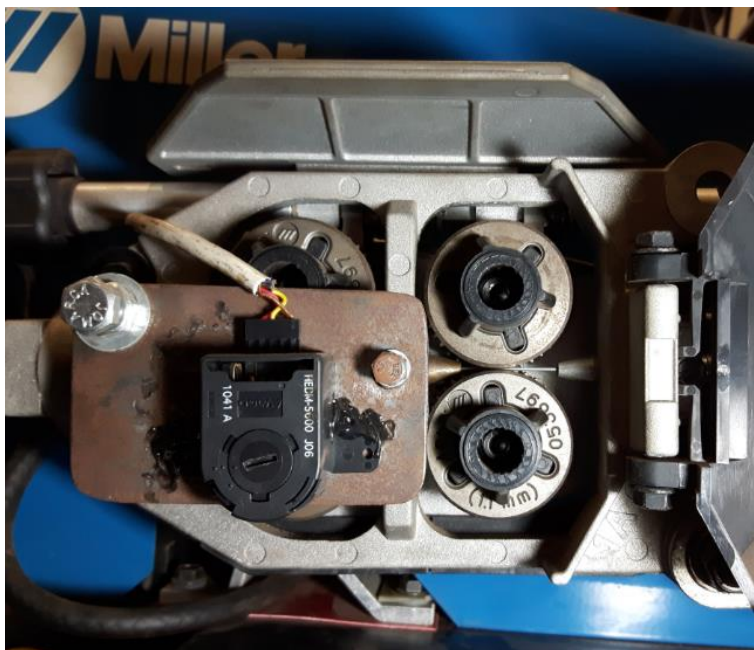


Figura 53. Encoder adaptado no cabeçote para medição de velocidade de alimentação

O circuito da Figura 54 é responsável pela contagem dos pulsos e conversão em velocidade de alimentação. Pode-se observar um conector de 3 vias acoplado ao sensor. Duas vias são para a alimentação e a outra para o sinal quadrado. Este sinal antes de ser lido pelo PIC3 (U17) passa por uma porta *schmitt trigger* (CI 74132) para ganhar uma maior estabilidade, ou seja, imunidade ao ruído. Em seguida esse sinal passa por um *jumper* para facilitar a leitura do sinal antes que entre no PIC3. Por fim, ao sair do *jumper*, esse sinal entra no pino 17 do PIC onde será feita a contagem do sinal. Diferentemente do PIC1 e PIC2, que possuem interface com displays 20x4, o PIC3 somente possui interface com a serial, para a qual envia os valores de velocidade de alimentação quando ocorre o disparo do sistema pelo botão A3 (pino 5).

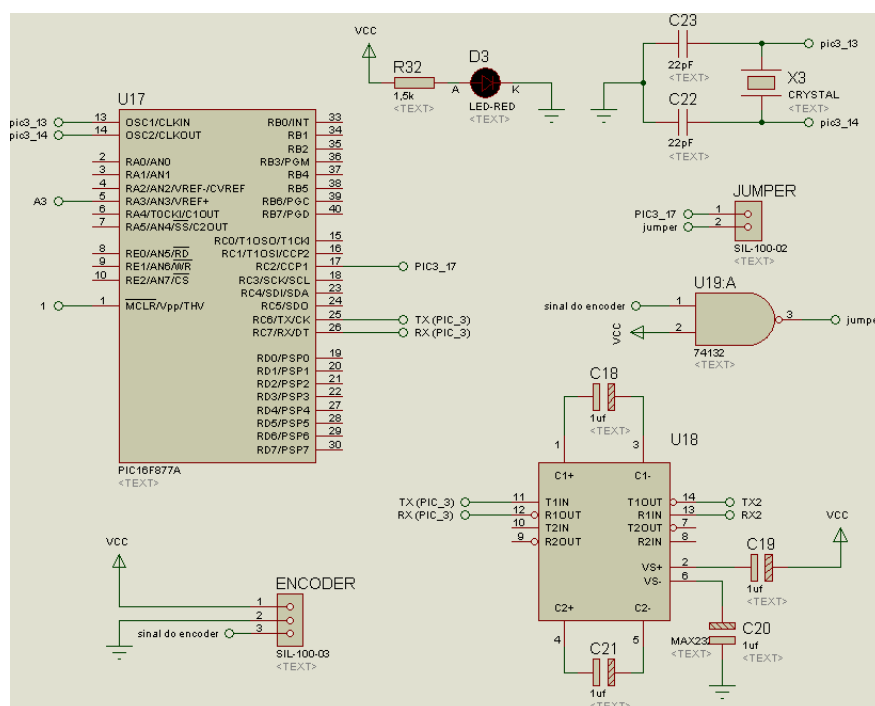


Figura 54. Circuito esquemático de leitura da velocidade de alimentação (PIC3)

### 5.7. Sistema de isolamento das portas de comunicação serial

Como descrito anteriormente, para o sinal de controle da tensão e da velocidade de alimentação, foi também utilizado um sistema de isolamento para proteção dos circuitos de comunicação serial. Como o circuito de comunicação serial dos PIC1 e PIC2 e do PIC3 devem ser ligados nas portas seriais do computador, foi realizado o



circuito de proteção da Figura 55 para se evitar problemas associados ao terra em comum.

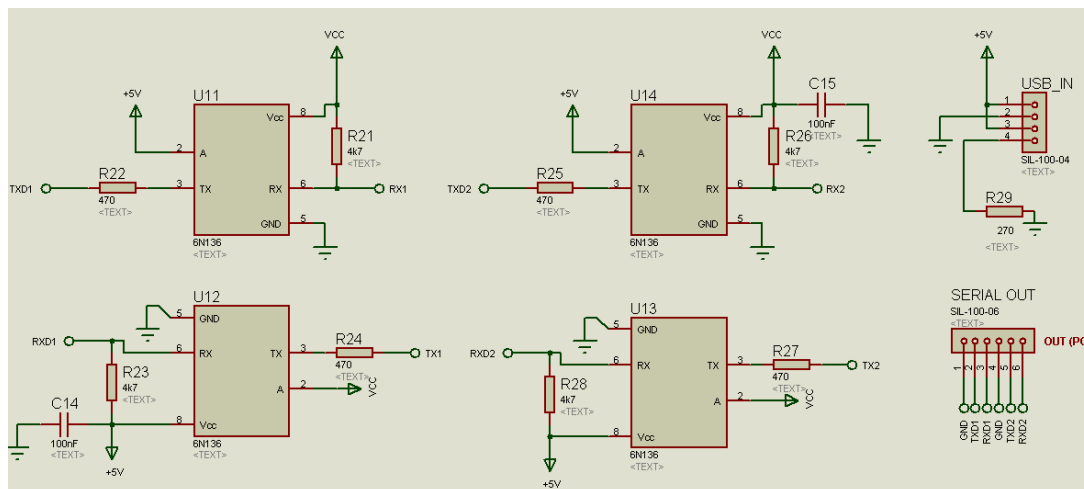


Figura 55. Circuito esquemático de proteção da comunicação serial

O CI 6N136 tem um funcionamento semelhante ao 4N25 embora seja mais apropriado para a comunicação serial em função da sua velocidade de comutação. Como de costume em circuitos isoladores, um lado é alimentado pelo circuito de entrada e o outro pelo de saída. Como a porta serial do computador não fornece uma alimentação de 5 Vdc, essa alimentação foi retirada de uma porta USB que por possuir um terra comum ao circuito da serial (possuem mesma fonte de alimentação - ATX) serve perfeitamente.

## 5.8. Sistema de alimentação para as placas

Anteriormente ao uso do pino 16 do PIC2 para se gerar o *PFM* (utilizado no controle da velocidade do Tartílope), utilizava-se este pino para gerar um *PWM* seguido de um filtro passa-baixa para se ter uma saída analógica de 0 – 5 Vdc. Essa tensão era ligada em um LM331 capaz de convertê-la em frequência. Apesar de ser um CI de precisão para conversão analógico-digital (tensão em frequência), a menor variação na tensão de entrada provocava uma grande variação na frequência de saída. Isso porque a escala de entrada era de 0 – 5 V e a de saída de 1 à 10 KHz. Entretanto, essa tensão máxima de saída somente era de 5 V caso a tensão de alimentação também fosse de 5 V.

Caso ela variasse, por exemplo para 5,3 V, a saída do *PWM* também variava e consequentemente a frequência enviada ao driver também. Embora a fonte de alimentação fosse uma fonte chaveada comercial e que deveria manter a tensão constante, devido as oscilações na rede de energia do laboratório, a tensão de saída sempre oscilava, o que resultava em variações na velocidade de soldagem.

Para contornar este problema, foi utilizado um circuito intitulado “*Tracking Preregulator Circuit*” utilizando-se dois reguladores de tensão ajustável LM317. A saída de tensão do primeiro regulador é ligada a entrada do segundo que já recebe dessa forma, uma tensão pré-ajustada. Entretanto a saída (pino 2 do U5) desse segundo regulador é ligada através de resistores no pino de ajuste do primeiro LM317 (U4), fazendo-se uma compensação.

Montado como apresentado na Figura 56, a saída de um circuito compensa o ajuste no primeiro, como em um circuito em malha fechada. Essa combinação permite uma tensão de saída constante até a segunda casa decimal, podendo-se ajustar através do potenciômetro RV1, uma tensão de saída de 5,00 V.

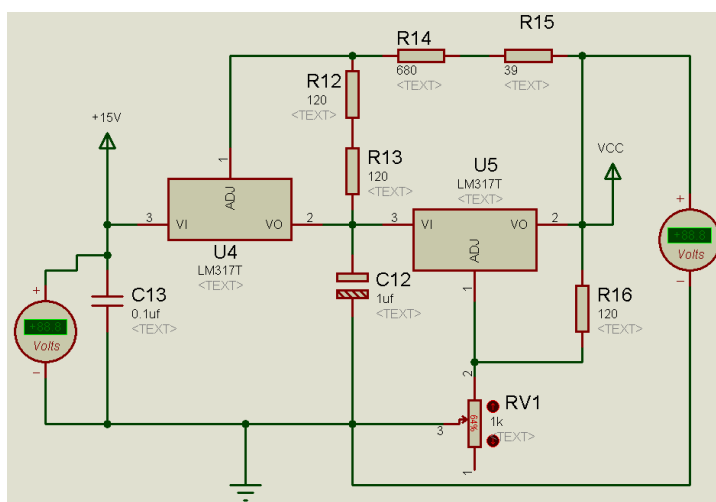


Figura 56. Circuito esquemático do “seguidor de tensão pré-regulado”

Após a utilização desse circuito, os problemas com variação de tensão na entrada dos PIC's foram eliminados. Embora tenha-se resolvido esse problema, deixou-se de se utilizar o CI LM331, em virtude não mais de oscilação da tensão, mas sim da baixa tolerância por parte dos componentes auxiliares necessários ao seu correto

funcionamento (resistores e capacitores). Optou-se assim por gerar a frequência variável (*PFM*) diretamente pelo PIC sem a utilização desse CI conversor. Embora não se tenha utilizado mais esse CI, o *Tracking Preregulator Circuit* foi mantido devido à grande estabilidade de alimentação proporcionada.

### 5.9. Layout da placa de circuito impresso do SVP

Apesar dos diversos circuitos elétricos apresentados realizarem tarefas independentes, optou-se por montá-los todos em uma única placa de circuito impresso. Essa medida visa reduzir a quantidade de cabos passando entre uma placa e outra e consequentemente problemas em decorrência de mau-contato. Observa-se na Figura 57, que aparentemente falta uma ligação entre os componentes U13 e U11 localizados no canto direito superior e representada por uma linha verde. Entretanto, essa ligação sugerida seria para fazer a ligação entre os terras de entrada e saída do CI 6N136. A lista completa dos componentes utilizados pode ser visualizada no APÊNDICE 5.

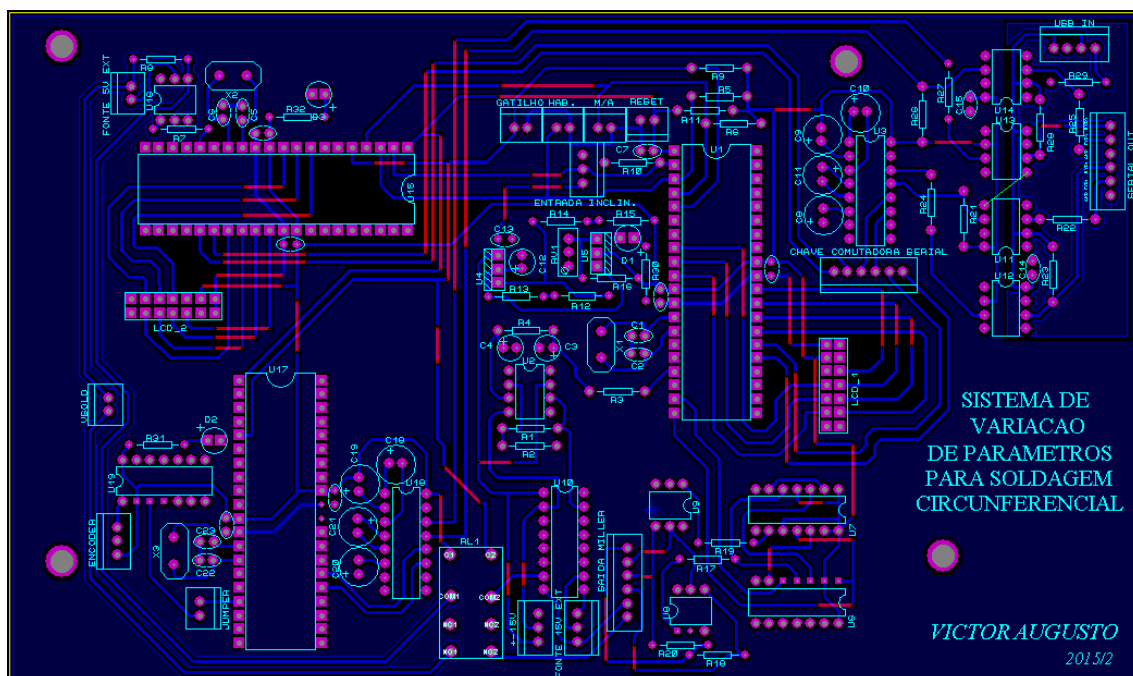


Figura 57. Layout da placa de circuito impresso do SVP

### 5.10. Sistema SVP depois de montado

Após confeccionar a placa da Figura 57 e soldar todos os componentes, partiu-se para a etapa de montagem na caixa. A caixa plástica utilizada foi uma Patola modelo Pb-900. Nela foram incluídos os botões, conectores e fontes de alimentação. Uma tampa de acrílico foi confeccionada e colocada no lugar da antiga de plástico cinza fosco. Na Figura 58, são apresentadas as vistas principais do sistema com os respectivos elementos acoplados e enumerados.

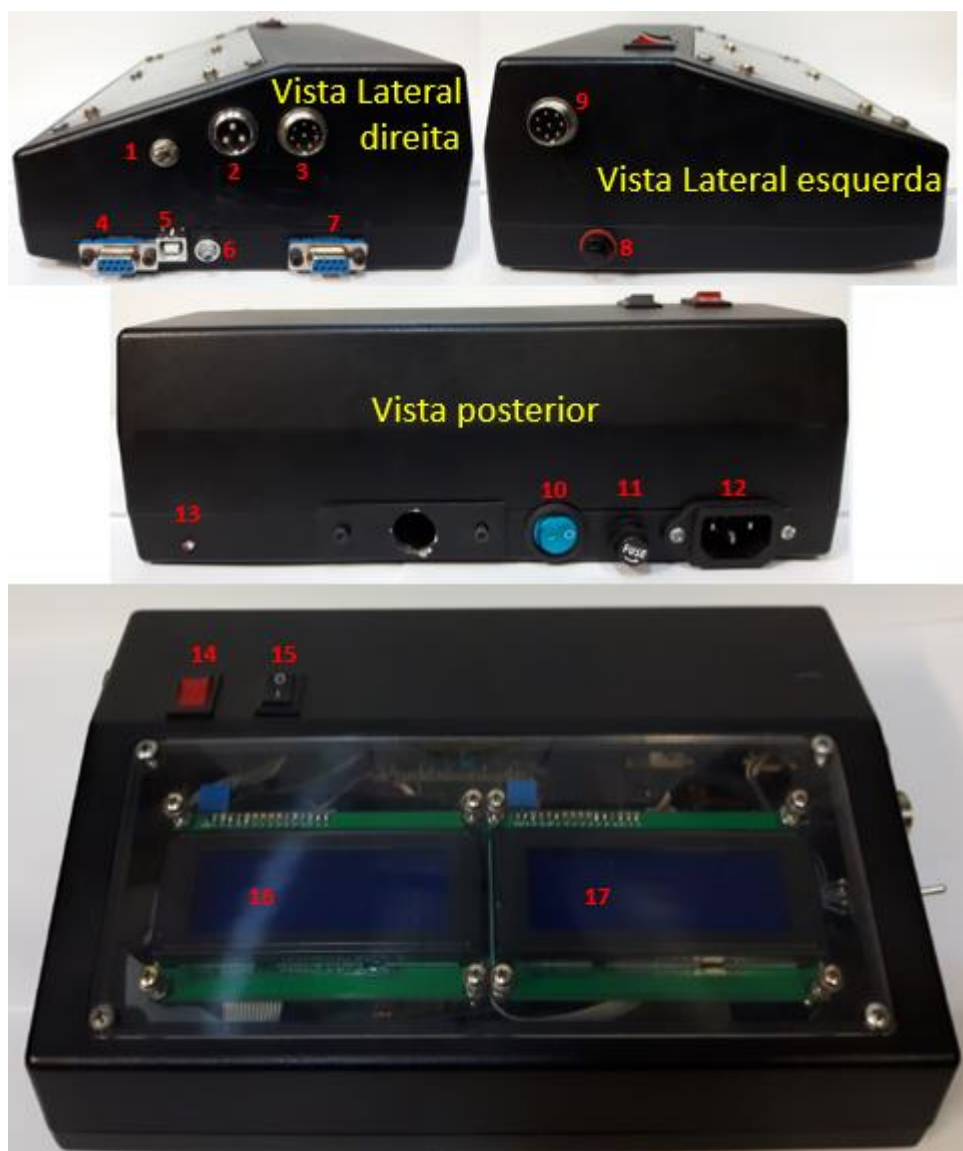


Figura 58. Vista externa do SVP

A chave indicada na Figura 58, é a responsável pela seleção de qual microcontrolador (PIC1 ou PIC2) será comutado ao conector DB9. O conector *USB* (5) é conectado à uma porta *USB* do computador para alimentar os CI 6N136 da Figura 55. Quando corretamente conectado, o *led* (6) é aceso. O outro conector DB9 indicado (7) é utilizado para a comunicação serial do PIC3. O conector de 3 vias (2) é utilizado para conectar o encoder que mede a velocidade de alimentação. O outro conector da vista lateral direita (3) é de 8 vias e utilizado para enviar os dados de controle ao cabeçote alimentador de arame. Na vista lateral esquerda se encontra outro conector de 8 vias (9) responsável por interligar o SVP ao Tartílope. O botão (8) localizado no canto inferior desta vista é utilizado para se “*resetar*” todo o sistema. Na vista posterior, a alimentação de 110 ou 220V é ligada ao conector 12. A chave 10 serve para ligar/desligar o sistema e o fusível 11 serve para proteção contra curtos. Quando a chave 10 está ligada e, conseqüentemente o sistema está alimentado, o *led* 13 também fica aceso. A chave 14 faz a seleção do modo manual/automático e a chave 15 habilita o disparo, deixando o sistema esperando o sinal do gatilho. No SVP não tem um botão de gatilho, uma vez que o sinal responsável por disparar a fonte da MILLER, o sistema de aquisição de dados (tensão e corrente) e ele próprio, vem do Tartílope. Ainda na vista principal pode-se observar dois *displays LCD*. O da esquerda (16) é ligado ao PIC2 e o da direita ao PIC1.

Com relação aos conectores descritos na Figura 58 é importante se destacar a pinagem dos cabos a eles conectados. Na Figura 59, é possível visualizar os pinos dos 3 cabos que saem do sistema SVP. Nota-se que o cabo que sai para o Tartílope se ramifica em 3 conectores. Em um conector de 2 pinos é acoplado o sinal da velocidade de soldagem e sua referência. Já no outro de 2 pinos é ligado o gatilho. Uma vez que o inclinômetro foi disposto dentro do carrinho, utilizou-se 3 vias ociosas do cabo que liga o carrinho ao gabinete de controle para a ligação do inclinômetro. Com isso, no gabinete do V4 foi colocado mais um conector MIKE de 3 vias para conectar o inclinômetro ao sistema SVP.





Figura 60. Vista interna do SVP

Ainda com base na Figura 60, observa-se um cooler refrigerando dois pequenos dissipadores. Esses dissipadores estão acoplados aos dois LM317 do *Tracking Preregulator Circuit* (Item 5.8). Como a alimentação desse circuito foi realizada com 15 V e sua saída é de apenas 5 V, a grande queda de tensão acaba por aquecer os dois reguladores, mas nada que extrapole o especificado em seu *datasheet* (documento de especificação do componente). Afim apenas de manter os componentes operando a níveis mais baixos de temperatura, dissipadores e cooler foram adicionados.

### 5.11. Levantamento das curvas de calibração dos circuitos.

Neste item, será apresentada a relação entre o sinal de controle enviado e a variável controlada.

### 5.11.1. Calibração do sinal do inclinômetro

No fluxograma apresentado na Figura 34, o elemento principal colocado no topo deste é o inclinômetro. É a partir da leitura do ângulo que o SPV determina qual decisão tomar com relação aos valores da velocidade de alimentação/soldagem e tensão.

Conforme mostrado na Figura 45, embora o sinal de saída do inclinômetro seja de corrente, após colocar um resistor de precisão em paralelo à saída, a leitura realizada pelo PIC é de um sinal de tensão.

Originalmente, o inclinômetro vem configurado para realizar medições em uma faixa de 0-360°. No entanto, somente necessita-se de leitura para a faixa de 0-180°. Com isso, é necessário “ensinar” o sensor limitando sua faixa de atuação. Para tal, coloca-se o sensor na posição inicial (0°) e aplica-se gnd em seu pino 5. Em seguida, coloca-o na posição final (180°) e mais uma vez aplica-se gnd ao pino 5. Feito isso, o sensor somente medirá entre esta faixa.

Para o Tartílope colocado na posição 0° (e consequentemente o inclinômetro), a tensão aplicada sobre a resistência é igual a 0.99V que após convertido por um conversor analógico-digital equivale ao número 203 (em uma escala de 0-1023 – 10 bits). Ao ser colocado na posição 180°, o valor equivalente no conversor AD é de 896. Assim, ao movimentar o Tartílope de 0 à 180°, é possível ver a leitura digital do PIC (depois do conversor AD converter o sinal de tensão) variar entre 203 e 896. Com isso, é possível através de uma interpolação linear relacionar o valor do conversor AD ao valor do ângulo equivalente. A Equação (2) a seguir permite calcular o valor do ângulo (em graus) em função do valor fornecido pelo conversor AD:

$$\text{ângulo} = 0.2597 * AD - 52.727 \quad (2)$$

### 5.11.2. Calibração do sinal de controle da tensão

Como apresentado na Figura 48, o sinal a ser enviado ao cabeçote alimentador de arame deve variar entre 0-10 V. Entretanto, o PIC1 gera um PWM que após passar por um filtro passa baixa tem-se 0-5 V e que segue para um circuito dobrador de tensão



resultando em 0-10 V. Sendo assim, para variar esse sinal de 0-10 V, a largura de pulso ( $t_{on}$ ) do PWM deve variar entre 0 e 100%.

Todos os programas gravados nos microcontroladores foram escritos no compilador *PICC* da *CCS C compiler*. Neste compilador existe uma função pronta para gerar *PWM*: *set\_pwm\_duty (duty)*. O valor da variável “*duty*” determina o percentual do período da onda em nível alto ( $t_{on}$ ). Entretanto, embora o tempo da onda em nível alto varie entre 0 e 100% do período da onda, o valor associado a variável “*duty*” neste caso varia entre 0 e 500. Isso ocorre pois a “escala” do valor de “*duty*” (para o PWM variar entre 0 e 100%) nem sempre é de 0 à 100, uma vez que depende do valor do *clock* do oscilador (Figura 44), da frequência do PWM e do *prescale* do *timer2*. A Equação (3) calcula o valor de “*duty*” para o PWM variando entre 0 e 100%:

$$duty = \frac{\left( \left( \frac{1}{freq} \right) * (\%PWM) \right)}{div\_by * \left( \frac{1}{clock} \right)} \quad 3)$$

Onde:  $freq$  = frequência do sinal PWM em Hz;

$\%PWM$  = valor percentual do período da onda em nível alto;

$div\_by$  = valor do *prescale* do *timer2*;

$clock$  = valor do cristal oscilador;

Com isso, calculando-se a equação (3) para os valores utilizados ( $freq.$  = 10kHz,  $div\_by$  = 4 e  $clock$  = 20MHz) tem-se que *duty* vale 0 para  $t_{on}$  = 0% e 500 para  $t_{on}$  = 100%.

Sabe-se então que ao ajustar o valor de *duty* em 500, o *PWM* estará em 100% e na saída do filtro passa baixa estará a tensão de 5V. Após dobrada pelo circuito com o CI741, tem-se 10 V no sinal de controle do cabeçote. É possível deduzir que se *duty* for 0, a tensão após o filtro será de zero e após dobrada permanecerá em zero. Mas e para valores intermediários, como é essa variação?

Essa pergunta pôde ser respondida após a realização de algumas medições. Com o sistema do SVP todo montado diversos valores foram associados à variável *duty* (para

cada valor, era necessário recompilar o programa e gravá-lo novamente no PIC1) e em seguida após o disparo do gatilho, era lido no display da fonte o valor correspondente de tensão de soldagem. Assim, foi possível gerar os dados apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Relação entre o *duty* do PWM e a tensão de soldagem

<b>duty PWM (0-500)</b>	<b>Tensão Sold. [V]</b>
50	13
100	16.7
150	20
200	23.7
250	27.3
300	30.9
350	34.4
400	38
450	41.7

A relação estabelecida entre o *duty* e a tensão de soldagem foi feita de forma direta. No entanto, ela poderia ter sido realizada de forma mais sistemática. Primeiramente, seria estabelecida uma relação entre o valor de *duty* e o valor da tensão de controle que entra no cabeçote (0-10V). Em seguida, seria feita uma relação entre o valor desse sinal de controle e o valor da tensão de soldagem. Apesar de se apresentar de forma mais didática, seria necessário mais etapas de cálculos no programa em C o que levaria a um maior esforço do processador além de consumir mais memória sem necessidade.

Na Figura 61, visualiza-se um gráfico obtido a partir da Tabela 6 onde se pode observar a tendência linear entre o valor do *duty* e da tensão de soldagem. A equação da linha de tendência calculada será utilizada no programa em C para se ajustar o valor de *duty* conforme se deseja ajustar o valor da tensão de soldagem.

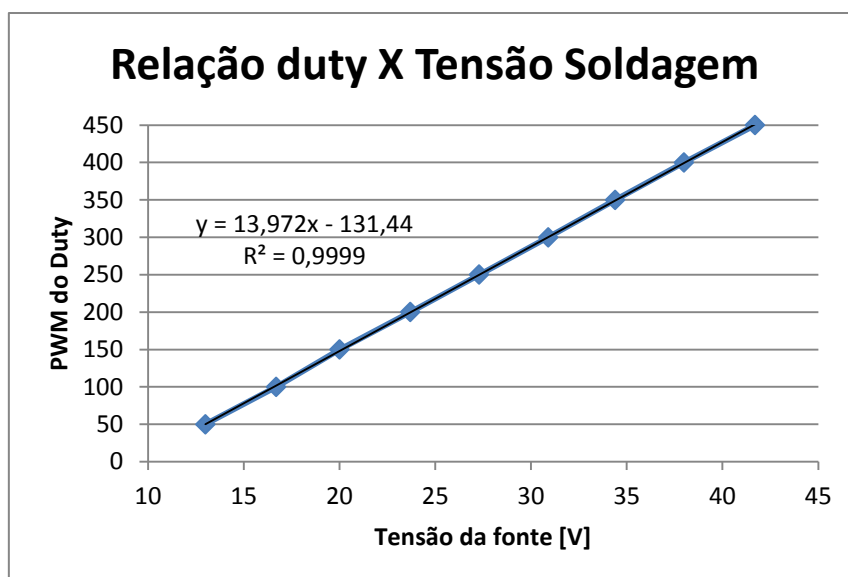


Figura 61. Relação entre o *duty* e a tensão de soldagem

### 5.11.3. Calibração do sinal de controle da velocidade de alimentação.

Diferentemente do sinal de controle da tensão que deve ser constantemente enviado enquanto se estiver soldando, o sinal de controle da velocidade de alimentação somente deve ser enviado quando se desejar incrementar/decrementar o valor. Assim, uma vez ajustado o valor inicial no cabeçote alimentador, a partir de pulsos enviados pelo PIC1, o valor da velocidade de alimentação é variado até que se chegue ao valor desejado. Uma vez chegado neste valor, os pulsos deixam de ser enviados e o cabeçote mantém esse valor de velocidade de alimentação. Entretanto, era fundamental saber quantos pulsos são necessários para se variar a velocidade de alimentação de 0,1 m/min.

O trem de pulsos enviado pelo PIC1 é gerado pela comutação de nível alto/baixo a partir uma porta digital. Contudo, para se variar a velocidade de alimentação, são necessárias duas sequências de pulsos defasadas de 90°. O sistema apresentado na Figura 49 fica responsável pela defasagem do sinal de origem do PIC1 ao custo de dividir a frequência desse sinal pela metade, ou seja, quando são enviados pelo PIC1 2 pulsos completos (4 transições entre nível alto/baixo), o circuito de defasagem de sinal envia ao cabeçote 2 pulsos defasados de 90° mas com somente 1 pulso cada (2 transições). Dessa forma, ajustava-se o PIC1 para mandar uma determinada quantidade de pulsos e observava-se o display do cabeçote para ver se haveria alguma alteração. Ressalta-se

que a cada modificação na quantidade de pulsos enviados, o microcontrolador precisava ser regravado. Nota-se ainda que não é necessário neste caso disparar a fonte para se observar o valor no display, uma vez que o cabeçote “entende” que o ajuste está sendo feito de forma manual pelo botão de ajuste (*knob*) da Figura 36. Por fim, percebeu-se que ao enviar 8 pulsos (16 transições de nível alto/baixo), a velocidade de alimentação variou de 0,1 m/min. Com isso, para se variar de 5,0 m/min para 4,5 m/min o PIC1 deve enviar 80 transições ( $16 \times 5 = 80$ ) ao circuito de defasagem de sinal que por fim envia 40 pulsos ao cabeçote.

Em suma, quando se desejar variar a velocidade de alimentação, basta multiplicar a quantidade de pulsos por 16 a cada 0,1 m/min de variação.

#### 5.11.4. Calibração do sinal de controle da velocidade de soldagem

No Item 5.5 foi dito que, para a variação da velocidade de soldagem no Tartilope (eixo x), era necessário enviar um sinal modulado em frequência (*PFM*). No entanto, o PIC 16F877A possui a função *PWM*, mas não *PFM*. Com isso, chegou-se a utilizar inicialmente um circuito que converte tensão em frequência (LM331). Assim, seria utilizada uma saída PWM para gerar um sinal analógico de 0-5 V (após passagem por um filtro passa-baixa) que seria novamente convertido para digital por este CI só que com frequência variável. Essa quantidade de conversões não funcionou muito bem (ver item 5.5) e essa topologia foi abandonada.

Embora não se tenha disponível a função dedicada ao *PFM*, é possível gerar um *PWM* (com *duty* de 50% - onda quadrada) que varie a sua frequência conforme necessidade somente via *software*.

No PIC utilizado, a base de tempo para geração do PWM é feita com base na interrupção do *timer2*. Ao se inicializar este timer no compilador CCS, é necessário informar o valor de 3 parâmetros, a saber: *prescale*, *period* e *postscale*. O *prescale* (PR2) pode ser de 1, 4 ou 16. O *period* (PR2) é um número inteiro que pode variar entre 0 e 255. Por fim, o *postscale* não é utilizado para determinação da frequência do *PWM*. A Equação (4) a seguir permite se calcular a frequência do PWM em função desses parâmetros:

$$freq = \frac{1}{(PR2 + 1) * 4 * \left(\frac{div\_by}{clock}\right)} \quad (4)$$

Onde:  $freq$  = frequência do PWM em Hz;

$PR2$  = período;

$div\_by$  = valor do *prescale* do *timer2*;

$clock$  = valor do cristal oscilador;

Observando-se a Equação (4), percebe-se que com o valor do  $clock$  (20MHz) e do  $div\_by$  (16) pré-determinados, o valor da frequência fica em função do valor do período.

Utilizando-se de um gerador de sinal, chegou-se à conclusão de que a menor velocidade possível com o Tartílope era alcançada quando uma frequência de 1 kHz era aplicada no driver do eixo x. Ao passo que a maior velocidade alcançada era obtida com 10 kHz. Para frequências menores que 1 kHz o carrinho não se movimentava e para frequências maiores que 10 kHz o circuito de potência de Tartílope era desarmado.

Reforça-se o fato de que ao ser mantido constante o valor da frequência enviada ao driver, o valor de velocidade de soldagem também é mantido constante. O próprio driver é responsável por fazer o controle interno e em malha fechada da velocidade do motor, mantendo como *setpoint* o valor da frequência.

Com base nas informações apresentadas, foi possível elaborar uma tabela com os valores de  $PR2$  e da frequência calculada. Com isso, o PIC2 era gravado com um valor de  $PR2$  determinado (que gerava uma determinada frequência) e após disparado o sistema, marcava-se com um cronômetro o tempo necessário para o Tartílope percorrer 90°. Mais uma vez, para cada valor de  $PR2$  configurado fazia-se necessário regravar o PIC2. No entanto, era possível associar um determinado valor de  $PR2$ /frequência a uma velocidade angular (90° dividido pelo tempo). Embora tenham sido realizadas 3 leituras de tempo, na Tabela 7 somente é apresentado o tempo médio.

Ainda na Tabela 7 é possível observar que foi calculada uma velocidade angular para cada valor de tempo médio averiguado. Ressalta-se que na soldagem orbital, a

velocidade a ser calculada é a angular, uma vez que a linear é o resultado da multiplicação dela pelo raio (distância do centro do tubo ao ponto de contato do arame com a peça – representado na Tabela 7 pela letra J). Para um mesmo valor de PR2, por exemplo, tem-se valores diferentes de velocidade de soldagem (linear) para o passe de raiz e para o passe de enchimento em um tubo, uma vez que o ponto de contato do arame no enchimento se dá sobre a raiz, resultando em um raio maior. Quanto maior a espessura do tubo, maior é essa diferença também.

É possível observar nesta tabela que nem todos valores de PR2 tem um tempo médio associado. Isto se deve ao fato de que em virtude da enorme quantidade de valores, as medições de tempo foram feitas de dois em dois valores de PR2 iniciando-se no 30 que corresponde a uma frequência de aproximadamente 10 kHz. Seguindo este raciocínio, somente foram feitas medições de tempo até PR2 = 74 que equivale a uma frequência de 4167 Hz, já que a velocidade linear equivalente calculada vale 38,83 cm/min. Como nos testes de soldagem previamente realizados não foram utilizados valores inferiores a este, não havia sentido de continuar medindo-se o tempo para velocidades menores.

Tabela 7. Tabela de calibração da velocidade de soldagem

PR2	frequência	t médio [s]	Wsold [rad/min]	vel lin p/ J=10,3 cm [cm/min]
30	10081	10,36	9,10	93,70
31	9766			
32	9470	11,03	8,54	88,01
33	9191			
34	8929	11,69	8,06	83,04
35	8681			
36	8446	12,37	7,62	78,48
37	8224			
38	8013	13,03	7,23	74,50
39	7813			
40	7622	13,69	6,88	70,91
41	7440			
42	7267	14,34	6,57	67,70
43	7102			
44	6944	15,03	6,27	64,59
45	6793			
46	6649	15,68	6,01	61,91
47	6510			
48	6378	16,37	5,76	59,30
49	6250			
50	6127	17,00	5,54	57,10
51	6010			
52	5896	17,75	5,31	54,69
53	5787			
54	5682	18,35	5,14	52,90
55	5580			
56	5482	19,04	4,95	50,98
57	5388			
58	5297	19,69	4,79	49,30
59	5208			
60	5123	20,31	4,64	47,80
61	5040			
62	4960	21,03	4,48	46,16
63	4883			
64	4808	21,68	4,35	44,78
65	4735			
66	4664	22,35	4,22	43,43
67	4596			
68	4529	23,03	4,09	42,15
69	4464			
70	4401	23,69	3,98	40,98
71	4340			
72	4281	24,34	3,87	39,88
73	4223			
74	4167	25,00	3,77	38,83

Observa-se que para valores de PR2 próximos a 30, o incremento de velocidade é consideravelmente maior do que para valores próximos a 70. Ao se variar PR2 de 30 para 32, por exemplo, a velocidade varia de 93,7 para 88,01 cm/min resultando em uma diferença de aproximadamente 5,7 cm/min. Já ao se variar PR2 de 70 para 72, a velocidade varia de 40,98 para 39,88 cm/min sendo uma variação de 1,1 cm/min.

Com base na Tabela 7, foi elaborado um gráfico de PR2 em função da velocidade de soldagem angular (Figura 62).

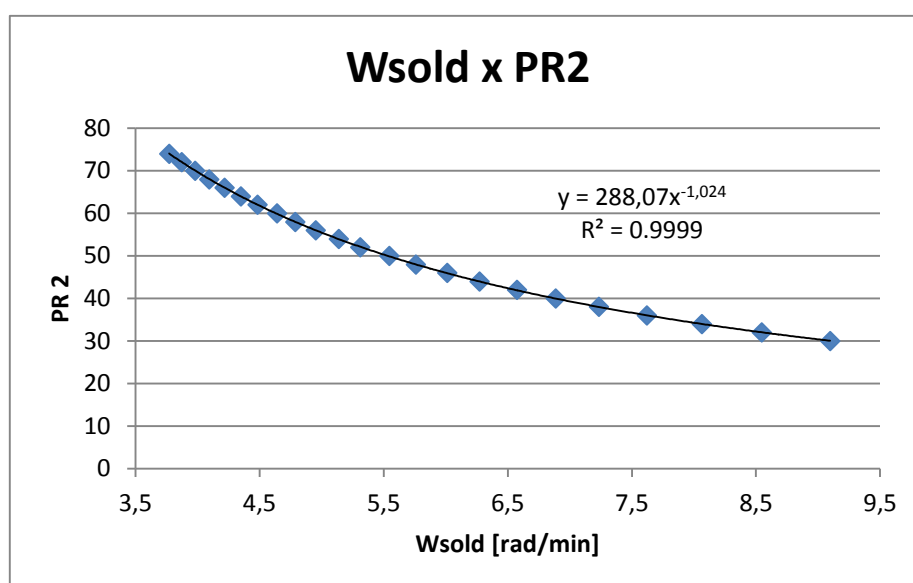


Figura 62. Relação entre PR2 e a velocidade de soldagem angular.

Como se pode observar, a curva gerada na Figura 62 se aproxima muito de uma curva de potência. A partir da equação que representa a curva de tendência é possível calcular qual o valor de PR2 corresponde ao valor desejado de velocidade de soldagem. Ainda na Figura 62, fica mais evidente o fato de que para velocidades mais elevadas a resolução da velocidade é menor, ou seja, o salto de valor de velocidade entre uma e a subsequente, é maior do que quando a velocidade tem valores menores. Dessa maneira, não se pode obter por exemplo uma velocidade de 93 cm/min, visto que ou se ajusta  $PR2 = 30$ , ou  $PR2 = 31$ . Entretanto, isso não traz prejuízos para os ensaios de soldagem, uma vez que buscou-se escolher velocidades de soldagem próximas aos valores possíveis de serem obtidos.



### 5.11.5. Calibração do encoder que mede a velocidade de alimentação

Para que se possa ler a velocidade de alimentação é necessário estabelecer uma relação entre a velocidade de alimentação e a frequência de pulsos lida no encoder. Para tal, primeiramente regulava-se uma velocidade de alimentação no cabeçote da fonte para uma alimentação manual. Salienta-se que a velocidade ajustada para o modo manual e automático (quando se vai soldar) são diferentes. Em seguida, o arame era cortado bem rente ao bico da tocha e logo em seguida uma quantidade arbitrária de arame era alimentada. Marcava-se o tempo necessário para se alimentar esse comprimento de arame (que também era medido). Ao mesmo tempo, através da comunicação serial com o computador, era possível se obter a frequência lida pelo encoder. Tal frequência deve se manter constante já que a alimentação também se mantém constante ao longo da operação. Ao final era feito uma média dos valores de frequência. Com isso, tem-se o valor regulado de velocidade de alimentação, o valor calculado (tamanho do arame dividido pelo tempo) e o valor da frequência correspondente a esta velocidade. Estes dados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Tabela de calibração do encoder de leitura da velocidade de alimentação

Velim regulada [m/min]	frequência lida no encoder [Hz]	tempo [s]	tamanho do aramé [cm]	Velim calculada [m/min]
3,0	411,45	14,65	74	3,03
4,0	542,19	13,18	91,5	4,17
5,0	665,57	10,06	85	5,07
6,0	800,69	7,68	79,8	6,23
7,0	937,67	13,37	159,1	7,14
8,0	1073,93	9,96	135	8,13

Nesta tabela ainda é possível notar que o valor regulado no cabeçote e, consequentemente mostrado no display, é muito próximo do valor medido da velocidade. Na Figura 63 é apresentado um gráfico da velocidade de alimentação em função da frequência do encoder.

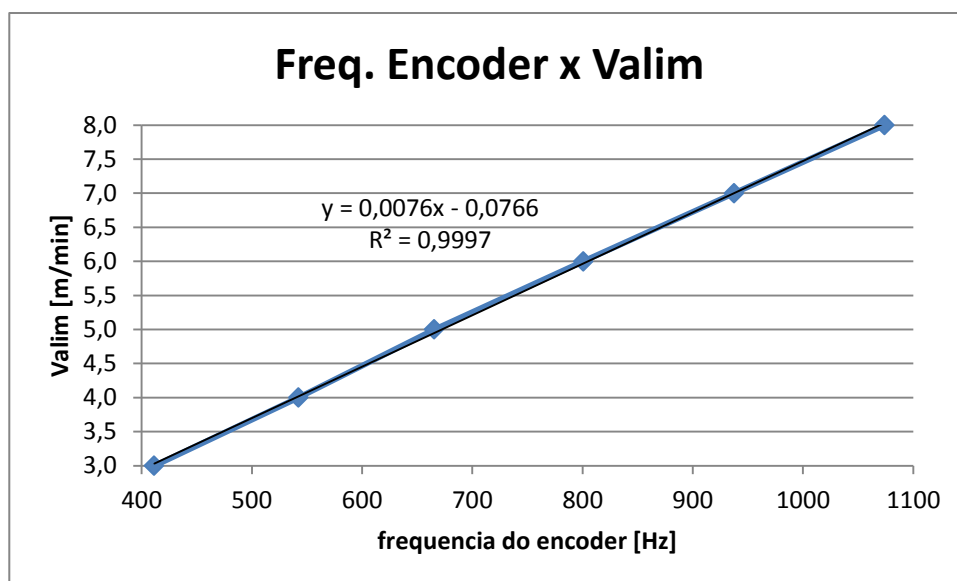


Figura 63. Relação entre a frequência do encoder e a velocidade de alimentação de arame

A equação da tendência apresentada na Figura 63 foi inserida no programa em C gravado no PIC3. Assim, sempre que o rolete do cabeçote alimentador girar, o PIC3 calculará a frequência do encoder e enviará o valor convertido em velocidade de alimentação através da porta serial ao computador. Esses dados podem agora ser salvos em txt, por exemplo.

## 5.12. Programas em linguagem C inseridos nos PIC

Os programas escritos para serem inseridos nos PIC1, PIC2 e PIC3 foram desenvolvidos em linguagem C, e compilados no compilador *PICC* da *CCS C compiler*.

Como mostrado no item 5.11, foi necessário carregar diversas versões de programa nos microcontroladores para se realizar a calibração dos circuitos. Normalmente, para se gravar um microcontrolador, ele é retirado do circuito, inserido em um gravador de PIC e após realizar a gravação, ele é retornado para o circuito de origem. Dada a inviabilidade de realização desse procedimento toda vez que se necessitava gravar um dos três PIC, utilizou-se de um sistema fornecido pela *Microchip* que permite que o programa seja gravado no PIC sem que ele seja retirado do circuito, apenas utilizando-

se da comunicação serial. Entretanto, antes de gravar os programas desenvolvidos para o sistema, deve-se gravar em cada um dos três PIC um arquivo fornecido junto ao BootLoader<sup>5</sup>. Além desse arquivo, para a gravação do PIC através do bootloader via RS232, no compilador antes do programa principal – `main()` – deve-se colocar a seguinte linha de código (ela reserva 255 bytes para o bootloader ser carregado no início da memória):

```
#org 0x1F00, 0x1FFF void loader16F877A(void)
```

```
main()
```

```
{ ..... }
```

Em seguida, o programa pode ser compilado normalmente gerando-se o código hexadecimal a ser gravado via RS232.

Para se carregar o arquivo no PIC, executa-se o aplicativo PICbootPlus.exe, seleciona-se o arquivo (*.hex* – programa compilado) e também a taxa de transferência de dados (utilizou-se 38400 bps). Ao clicar no botão *write*, o aplicativo ficará esperando por um *reset* no PIC para começar a transferência do arquivo.

---

<sup>5</sup> Esse e outros arquivos podem ser gratuitamente baixados da internet através do link: <http://www.microchip.com/PIC16bootload/#how>

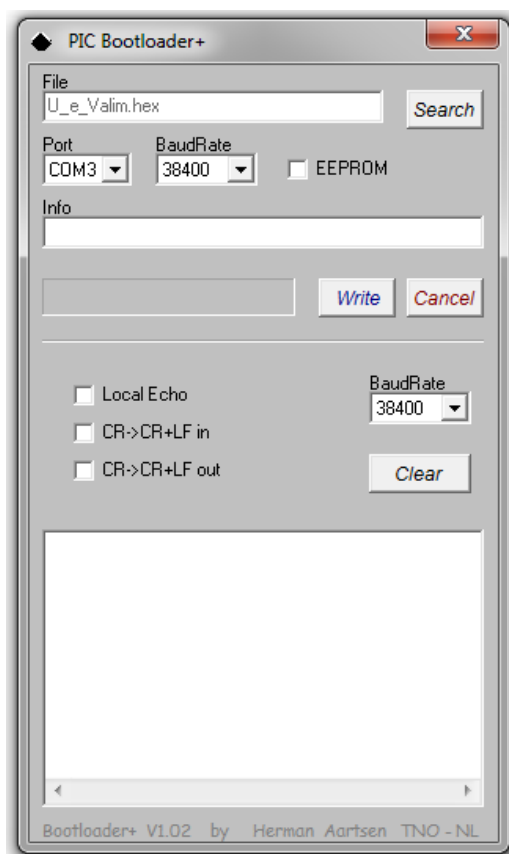


Figura 64. Tela do PICbootPlus.exe

O programa inserido no PIC1 e no PIC2 é basicamente o mesmo. Na verdade, se o PIC16F877A tivesse mais memória e pudesse gerar *PWM* com frequências diferentes (cada *PWM* com a sua própria base de tempo – distinta do *timer2*), não haveria necessidade de se utilizar dois PIC para controlar tensão, velocidade de alimentação e velocidade de soldagem. Contudo, para gerar o *PFM* de controle da velocidade de soldagem, foi necessário alterar o *timer2* para se gerar cada frequência diferente. Com isso, se estivesse no mesmo programa, o *PWM* gerado para o controle da tensão ficaria variando não somente a frequência como também o *duty*. Além do mais, o programa inserido no PIC1 já está no limite de memória disponível do PIC utilizado e seria difícil inserir mais linhas de código para o controle da velocidade de soldagem. Pelos motivos apresentados, a estrutura básica do programa no PIC1 e PIC2 é a mesma. Na Figura 65 é apresentado um fluxograma do programa inserido tanto no PIC1 como no PIC2.

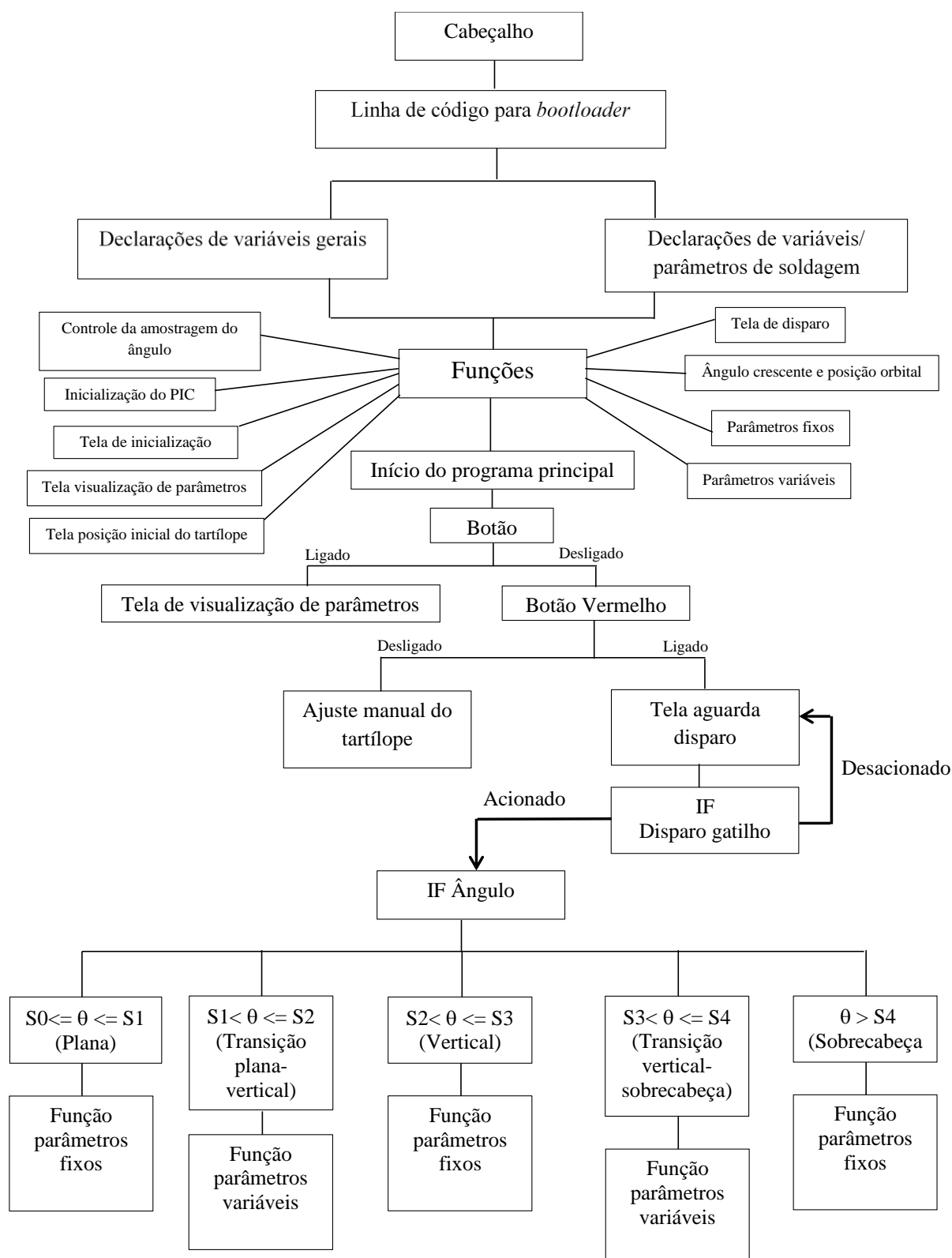


Figura 65. Fluxograma do programa inserido no PIC1 e PIC2

Um pseudocódigo explicativo e os programas completos podem ser visualizados nos APÊNDICES 1, 2 e 3.

Analisando-se o fluxograma da Figura 65, nota-se que o programa começa com o cabeçalho e em seguida coloca-se a linha de código necessária para gravação do PIC através do *bootloader*.

Em seguida, iniciam-se as declarações das variáveis. Nesta etapa o fluxograma foi dividido em dois blocos de variáveis. O primeiro diz respeito a variáveis auxiliares utilizadas ao longo do código. Já o segundo, diz respeito tanto aos parâmetros de soldagem (tensão/velocidade de alimentação para o PIC1 e velocidade de soldagem para o PIC2 – para cada posição de soldagem) como dos valores que definem a faixa de cada posição de soldagem (plana/vertical/sobrecabeça). Estes valores devem ser editados sempre que se desejar realizar uma solda com um novo conjunto de parâmetros.

Seguindo o fluxograma, são apresentadas 9 funções. Estas funções são declaradas no início do programa e somente são chamadas no código quando se desejar. A primeira função utiliza o estouro do *timer0* para ler o sinal de tensão do inclinômetro para então convertê-lo em um valor de ângulo a partir da Equação (2). No entanto, o valor do ângulo somente é convertido após a realização de uma média dos 100 primeiros valores de tensão a fim de se obter uma maior estabilidade no valor do ângulo.

A segunda função, configura os *timers*, as interrupções, os canais analógico/digital além de iniciar o LCD.

As próximas quatro funções, são referentes ao LCD nas quais são apresentadas telas de interface com o usuário. Como o PIC1 e PIC2 são iniciados juntos, utiliza-se o LCD1 e o LCD2 sequencialmente, de forma que o primeiro inicia a frase e o segundo termina. Na função tela de inicialização, por exemplo, aparece na tela dos dois LCDs a apresentação inicial do SVP (Figura 66) durante 3 segundos ao se ligar conjunto.



Figura 66. Tela de inicialização do SVP

Já na função tela de parâmetros, aparece na tela do LCD os parâmetros de soldagem a serem utilizados, bem como a faixa angular em que os valores serão variados (Figura 67a). Esta tela fica aparente durante 5 segundos. Após este tempo, aparece a tela da Figura 67b que fica aparente durante 1,5 segundo. Caso o botão preto seja pressionado, essa tela desaparece e abre no lugar a tela da Figura 68. Caso o botão não seja apertado, a tela da Figura 67a reaparece e fica em loop com a tela da Figura 67b até que se aperte o botão preto.

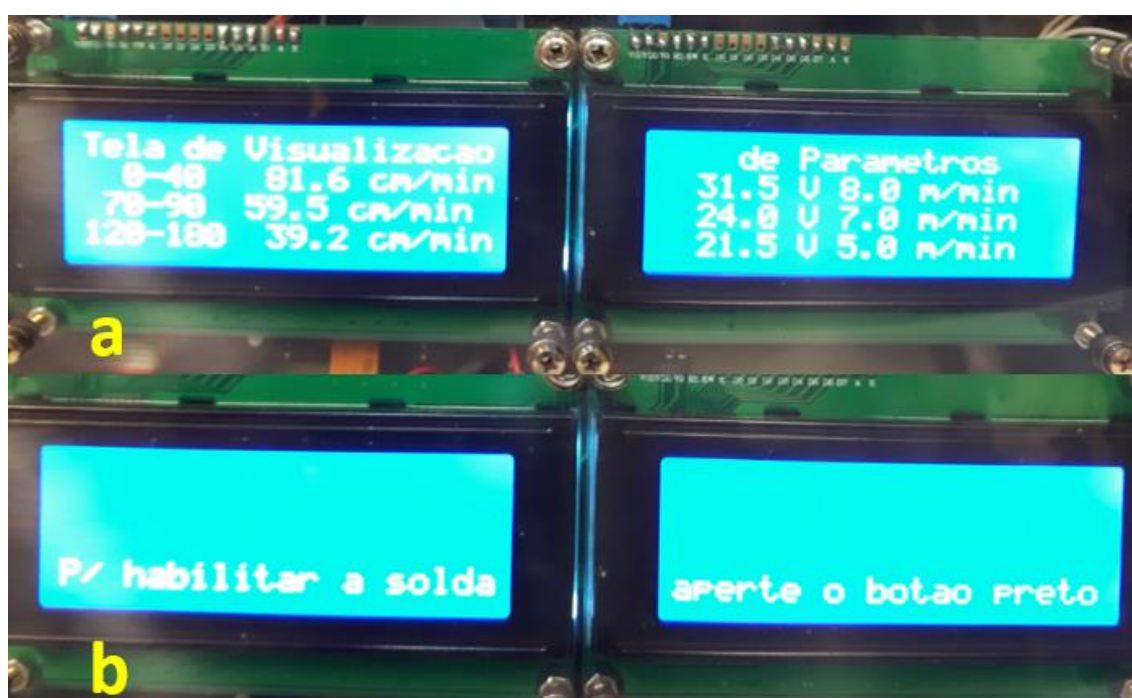


Figura 67. Tela de visualização dos parâmetros

A função “tela posição inicial do Tartílope”, somente aparece ao ser pressionado o botão preto. Nesta tela, visualiza-se o ângulo em que o Tartílope se encontra para que, através do controle de posicionamento manual dele, se possa levá-lo à posição inicial ( $0^\circ$ ) para execução da soldagem (Figura 68).

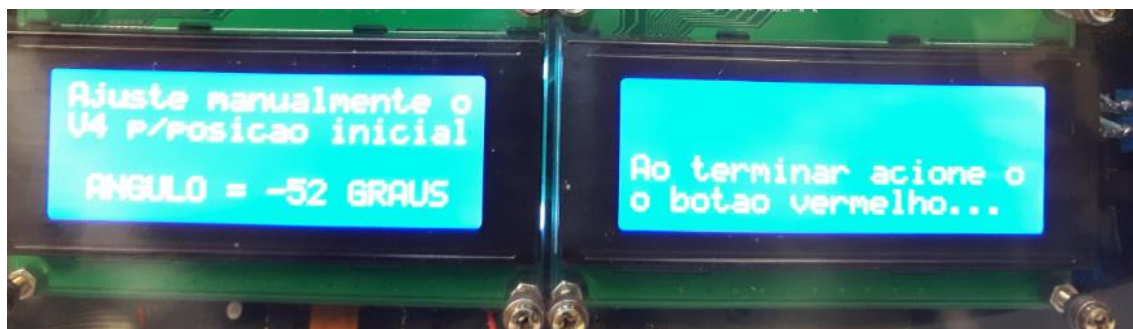


Figura 68. Tela de posição inicial do Tartílope

Observa-se que na Figura 68, o valor mostrado para o ângulo é de  $-52^\circ$ . Obviamente, o Tartílope não se encontrava numa posição “negativa” no momento em que foi gerada essa imagem. Isto ocorreu, devido ao cabo que liga o SVP ao inclinômetro não estar conectado no momento em que foi gerada a imagem. Salienta-se que como comentado no item 5.11.1, o valor de leitura do ângulo varia entre  $0$  e  $180^\circ$ .

Ao pressionar o botão vermelho, a função “tela de disparo” é chamada e na tela dos LCDs pode ser vista a mensagem “Aguardando disparo” conforme Figura 69.



Figura 69. Tela aguardando disparo

A próxima função – ângulo crescente e posição orbital – estipula que a variação do valor do ângulo seja sempre crescente. Uma vez que todas as soldagens com variação de parâmetros foram realizadas no sentido descendente, a variação do ângulo sempre ocorreria no sentido crescente (de  $0^\circ$  para  $180^\circ$ ). Com isso, teoricamente não faria sentido uma função para realizar essa tarefa. No entanto, considera-se o caso em que, uma transição deva ocorrer em por exemplo,  $30^\circ$ . À medida que o Tartílope se



desloca e aproxima deste ponto, o valor do ângulo vai sendo acrescido. Ao chegar em 30°, a transição de parâmetros se inicia. Caso ocorra uma leitura incorreta por alguma instabilidade na movimentação e o valor do ângulo lido seja de por exemplo 29°, outra transição se iniciará e causará uma instabilidade no funcionamento do sistema. Apenas para conferir maior estabilidade de funcionamento, essa função sempre é chamada durante a movimentação em modo automático. Além de desempenhar esta tarefa, esta função exibe na tela do LCD a posição orbital da solda (plana/transição plana-vertical/vertical/vertical-sobrecabeça/sobrecabeça) durante a execução da solda em modo automático.

Por fim, as duas últimas funções – parâmetros fixos e parâmetros variáveis – apresentadas são as verdadeiras responsáveis por variar os parâmetros de soldagem. A primeira delas – parâmetros fixos – é chamada assim já que ajusta os valores de tensão de soldagem (PIC1) e velocidade de soldagem (PIC2) para as faixas em que estes valores são constantes (posições plana/vertical/sobrecabeça). Reforça-se que a função parâmetros fixos não ajusta nenhum valor para a velocidade de alimentação uma vez que esta somente é variada em função de pulsos que incrementam/decrementam o valor nas faixas de transição. Assim, é justamente na função parâmetros variáveis que os valores de velocidade de alimentação/tensão para o PIC1 e velocidade de soldagem para o PIC2 mudam ao longo das faixas variáveis (transição plana/vertical e vertical/sobrecabeça).

Por fim, o programa gravado no PIC3 faz a leitura entre duas subidas de borda do sinal de entrada. A diferença de tempo lido entre uma subida e a outra, fornece o valor do período do sinal. Com isso, invertendo-se este valor tem-se a frequência deste sinal que após ser calculado é enviado a porta serial do computador. O programa que recebe estes dados é o RComSerial<sup>6</sup> e permite que os dados lidos sejam gravados em txt (Figura 70).

---

<sup>6</sup> Este software para testar dispositivos que se comunicam através da Porta Serial RS232 pode ser encontrado para download em <http://www.rogercom.com/download/Downloads.htm>



Figura 70. Interface do RComSerial para leitura da velocidade de alimentação de arame

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para a soldagem de meia cana em tubos utilizando-se o processo GMAW com transferência metálica por curto-circuito convencional e controlado (STT, RMD e CMT), para a união de juntas com bisel em 15° em tubos API 5L X65 de 8” de diâmetro para os passes de raiz e enchimento.

Os primeiros resultados dizem respeito a validação dos parâmetros ora utilizados em chapas no SSDR, agora em tubos. Em seguida, os passes de enchimento foram realizados sobre sua respectiva raiz (mesmo processo).

Os melhores cordões de solda definidos por meio de inspeção visual foram separados para análise metalográfica e, após avaliação segundo critérios de aceitabilidade da norma API 1104 (2010), foram submetidos a ensaios mecânicos (tração, dobramento de face, dobramento de raiz, charpy, dureza e nick-break).

Em seguida, serão discutidos os resultados do levantamento de parâmetros para o passe de raiz nas três posições. Estes dados serão utilizados como base para soldagem de raiz com o SVP. Da mesma forma, serão apresentados os resultados alcançados para o levantamento de parâmetros para passe de enchimento no tubo usinado. Por fim, serão apresentados os ensaios metalográficos da solda resultante dos parâmetros levantados para a raiz e enchimento com o sistema de variação de parâmetros desenvolvido.

Para a realização de todas as soldas deste trabalho, alguns parâmetros se mantiveram constantes, sendo eles, a mistura Ar+25%CO<sub>2</sub> com vazão de 15 l/min, sem o uso de Hi/Low (desalinhamento), sem cobre junta, eletrodo ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro e tecimento triangular. Os valores de amplitude e frequência de tecimento variaram de um teste para outro, mas seus valores serão mencionados durante a apresentação de cada teste. Para o processo convencional, manteve-se a indutância em 40%, uma vez que para este processo utilizou-se somente a fonte da MILLER.

### 6.1. Realização das soldagens em tubo dos parâmetros obtidos com o SSDR (raiz)

Conforme já mencionado na metodologia deste trabalho, neste item serão apresentados os resultados da validação dos parâmetros obtidos com o SSDR por

Magalhães (2012), mas só que agora em tubos. Dentre todo o envelope operacional levantado com o SSDR para os processos convencional/STT/RMD/CMT (Figura 31), iniciou-se os testes em tubo com os parâmetros centrais de cada processo com o gás Ar+25%CO<sub>2</sub>. Esses parâmetros foram apresentados na Tabela 3 apresentada no item Sequência Metodológica.

#### **6.1.1. Passe de raiz para o processo convencional**

O primeiro passe de raiz realizado em tubo para o processo convencional utilizando os parâmetros levantados no SSDR não obteve sucesso (Raiz\_conv\_1 - Tabela 9). Na posição plana, o arco não se manteve estável sobre a junta a perfurava. Por este motivo, a DBCP que nos testes com o SSDR era de 15 mm (Magalhães, 2012), passou para 18 mm, a fim de diminuir-se o efeito de perfuração da raiz.

Com o valor modificado nos testes seguintes, o efeito da instabilidade da poça melhorou, embora ainda tivesse tendência de perfuração. Aumentou-se a tensão de 19 V para 21 V (Raiz\_conv\_3). A estabilidade do arco melhorou ainda mais. O reforço na raiz ficou zerado (no mesmo alinhamento do tubo) parecendo até que se tinha utilizado cobre-junta. Em um exame visual, o cordão aparentemente estava adequado. Entretanto, Nascimento (2015) soldou a mesma junta com o processo convencional, não obtendo sucesso. Em seus ensaios, ele conseguiu completar a solda, mas esta apresentou visivelmente falta de penetração em parte da posição plana, em toda a posição vertical e sobrecabeça devido a escorrimento. Por fim, ele optou por aumentar a velocidade de soldagem de 31 cm/min para 39 cm/min.

Em contrapartida, foi realizado neste trabalho o mesmo teste que Nascimento (2015) e verificou-se que foi possível sim realizar a soldagem tanto com 31 cm/min como com 39 cm/min. Para a velocidade de 31 cm/min em que Nascimento não conseguiu bons resultados e, neste trabalho obteve-se, há algumas hipóteses que podem justificar o ocorrido. A primeira diz respeito ao sistema de movimentação (Tartilope). Como mostrado na Figura 28, a tocha de soldagem era anteriormente presa ao Tartilope em um alinhamento diferente da direção radial. Com isso, ao realizar as soldagens, o controle da DBCP realizado por Nascimento (2015) fazia as correções que acabavam por causar um efeito de “puxar” ou “empurrar” a poça. Além do mais, diferenças entre a

calibração da velocidade de soldagem, ou mesmo da conversão da velocidade ajustada no sistema do Tartílope em função de andar sobre a cinta, podem ter causado esta diferença.

Tabela 9. Parâmetros utilizados para passe de raiz (convencional)

Raiz em tubo (Convencional)	$U_{reg}$ [V]	$V_{lim_{reg}}$ [m/min]	$V_{s_{real}}$ [cm/min]	DBCP [mm]
Raiz_conv_1	19	5	31	15
Raiz_conv_2	19	5	31	18
Raiz_conv_3	21	5	31	18
Raiz_conv_4	21	5	39,2	18

Todos os testes da Tabela 9 foram realizados com tecimento triangular com frequência de 3,2 Hz e amplitude de 3,0 mm. A tocha de soldagem foi mantida em 0°, ou seja, na direção radial do tubo.

Na Figura 71, observa-se o oscilograma de tensão e corrente do ensaio Raiz\_conv\_4. Como tanto o ensaio Raiz\_conv\_3, como o Raiz\_conv\_4 obtiveram bons resultados, optou-se por adotar como parâmetro este último por possuir maior velocidade de soldagem. É claro que a área de seção transversal preenchida pelo Raiz\_conv\_4 é menor que a do Raiz\_conv\_3. No entanto, essa diferença não impede o passe posterior de enchimento. Observa-se ainda na Figura 71, os valores de tensão e corrente adquiridos durante a soldagem. Tanto os valores médios como os RMS foram calculados considerando toda a solda, uma vez que os parâmetros de soldagem em todas as posições são um só.

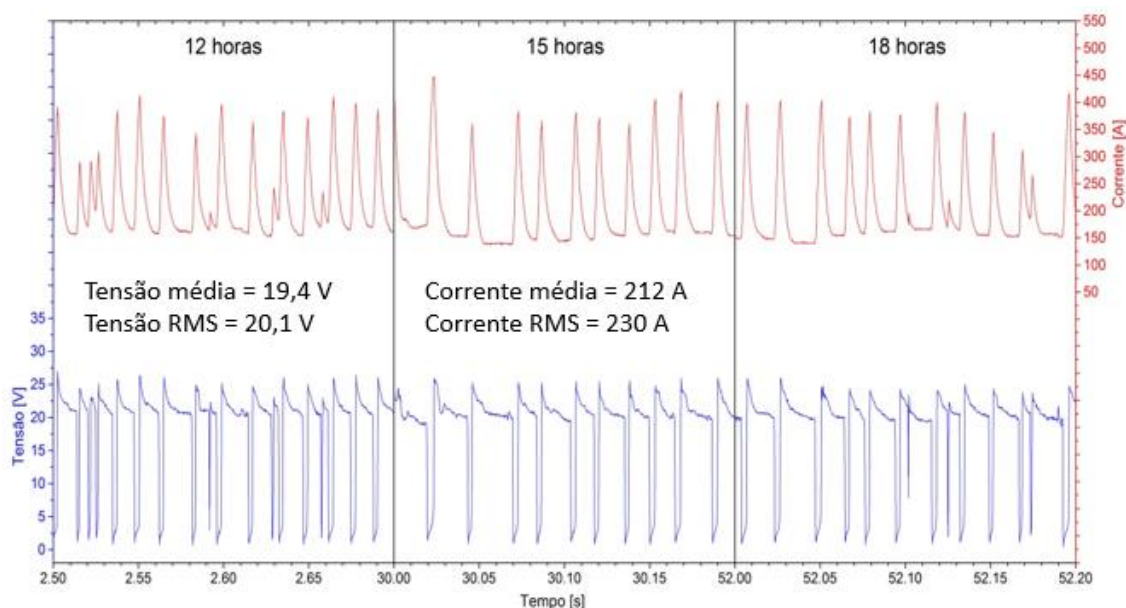


Figura 71. Oscilograma do passe de raiz do teste Raiz\_conv\_4

### 6.1.2. Passe de raiz para o processo STT

Em seguida, partiu-se para o passe de raiz em tubo com os parâmetros do STT. Na Tabela 10 é apresentado o conjunto de parâmetros do único teste necessário para validar os resultados obtidos com SSDR pra o STT. Este foi realizado com tecimento triangular com frequência de 3,6 Hz e amplitude de 3,0 mm. A tocha de soldagem foi mantida em  $0^\circ$ , ou seja, na direção radial do tubo.

Tabela 10. Parâmetro utilizado para passe de raiz (STT)

Raiz em tubo (STT)	Ib [A]	Ip [A]	Tout	Valim <sub>reg</sub> [m/min]	Vs <sub>real</sub> [cm/min]	DBCP [mm]
Raiz_STT_1	130	350	10	5,75	35	15

Na Figura 72 está representado o oscilograma de tensão e corrente do ensaio Raiz\_STT\_1, bem como os valores de tensão e corrente adquiridos durante a soldagem. Tanto os valores médios como os RMS foram realizados considerando toda a solda, uma vez que os parâmetros de soldagem em todas as posições são um só. Chama-se a atenção para a obtenção de valores maiores de corrente e menores de tensão para o STT em relação ao convencional. É claro que a velocidade de alimentação é maior. Entretanto, mesmo com uma alimentação de arame maior e com uma DBCP de 15 mm

(no convencional somente se conseguiu com 18 mm), o processo STT consegue soldar a junta sem perfuração da raiz.

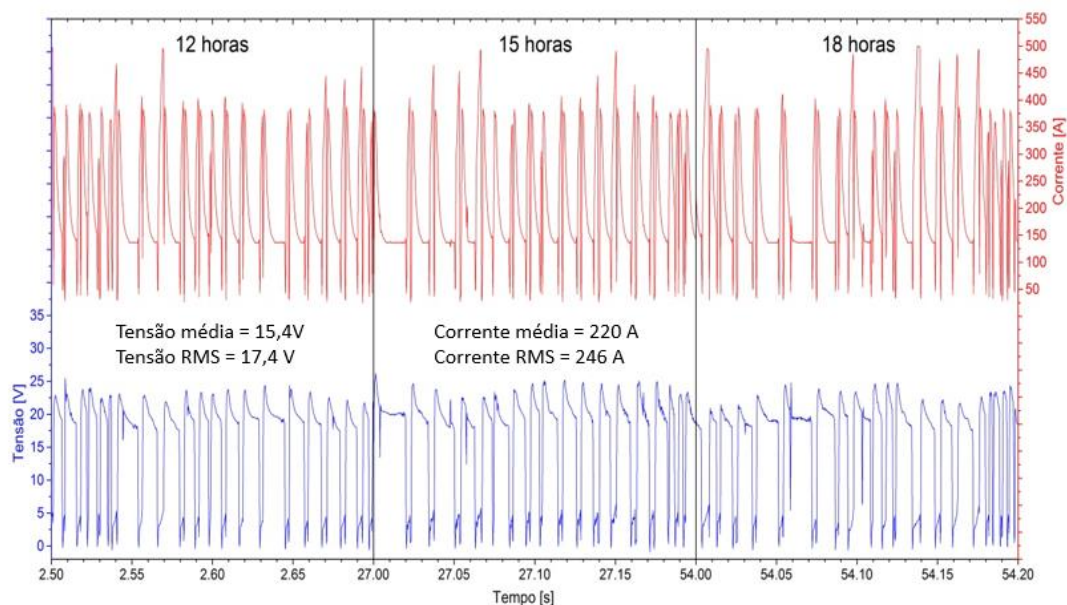


Figura 72. Oscilograma do passe de raiz do teste Raiz\_STT\_1

### 6.1.3. Passe de raiz para o processo RMD

O RMD também apresentou uma grande facilidade na validação do resultado obtido em chapa com o SSDR. A condição utilizada na Tabela 11 é exatamente igual ao da Tabela 3.

Tabela 11. Parâmetro utilizado para passe de raiz (RMD)

Raiz em tubo (RMD)	Trim	Arc Control	Valim <sub>reg</sub> [m/min]	Vs <sub>real</sub> [cm/min]	DBCP [mm]
Raiz_RMD_1	75	25	5,2	32	15

Na Figura 73 está representado o oscilograma de tensão e corrente do ensaio Raiz\_RMD\_1, bem como os valores de tensão e corrente adquiridos durante a soldagem. Ressalta-se que o processo RMD foi o apresentou os maiores valores de tensão/corrente RMS.

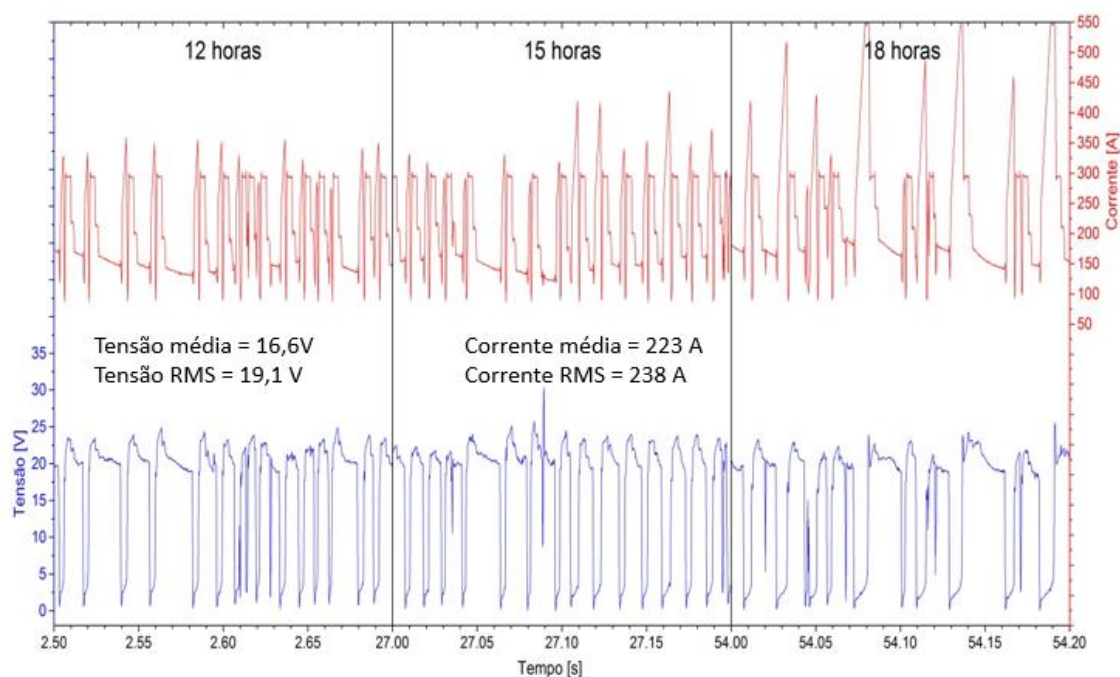


Figura 73. Oscilograma do passe de raiz do teste Raiz\_RMD\_1

#### 6.1.4. Passe de raiz para o processo CMT

Para o ensaio com o processo CMT, foi necessário primeiramente substituir a tocha de soldagem utilizada em todos os outros processos, para a tocha dedicada do CMT. Para o teste, embora a tocha manual da CMT tenha uma curvatura, posicionou-se o bocal na direção radial do tubo mantendo-se em  $0^\circ$ . Este foi realizado com tecimento triangular com frequência de 3,0 Hz e amplitude de 3,0 mm.

Outro detalhe a se atentar para a realização do passe de raiz com o CMT, diz respeito a velocidade de alimentação. A fonte da *Fronius*, que realiza o CMT, faz o controle do processo GMAW através do controle da adição de arame. Diferentemente das demais (Lincoln com o STT e Miller com o RMD), ela não mantém a alimentação de arame e atua eletronicamente no ajuste da corrente. Ela faz ao contrário, mantém uma determinada corrente e adiciona mais ou menos arame para manter essa corrente. No entanto, em seu display não se regula corrente. Regula-se velocidade de alimentação que não necessariamente se manterá constante para manter uma corrente correspondente. Isto dificulta o cálculo da velocidade de soldagem para se manter uma mesma área de seção transversal.



Nesse sentido, Magalhães (2012) levantou uma curva de calibração para a situação específica do passe de raiz em uma junta igual a que está sendo utilizada. É por isto que na Tabela 12, verifica-se um valor regulado ( $Valim_{reg}$ ) que proporcionará um valor real de alimentação de arame ( $Valim_{real}$ ). Assim como no teste para o STT, não houve necessidade de se alterar para 18 mm o valor da DBCP em relação aos testes realizados com o SSDR sendo então mantido em 15 mm.

Tabela 12. Parâmetro utilizado para passe de raiz (CMT)

Raiz em tubo (CMT)	Parâmetro comp. do arco	Controle dinâmico	$Valim_{real}$ [m/min]	$Valim_{reg}$ [m/min]	$V_{s_{real}}$ [cm/min]	DBCP [mm]
Raiz_CMT_1	25	2,5	5,2	6,0	31	15

Ao regular os parâmetros na fonte e ajustar a tocha no Tartílope, a solda foi realizada sem maiores problemas. Visualmente o cordão não apresentou problemas. A análise de porosidade, falta de fusão, dentre outros são realizados em conjunto com o passe de enchimento (Item 6.3 que ainda será apresentado) para os melhores cordões selecionados por meio de inspeção visual.

Na Figura 74 está representado o oscilograma de tensão e corrente do ensaio Raiz\_CMT\_1, bem como os valores de tensão e corrente adquiridos durante a soldagem. Ressalta-se a grande regularidade nos curtos conseguida pelo processo CMT.

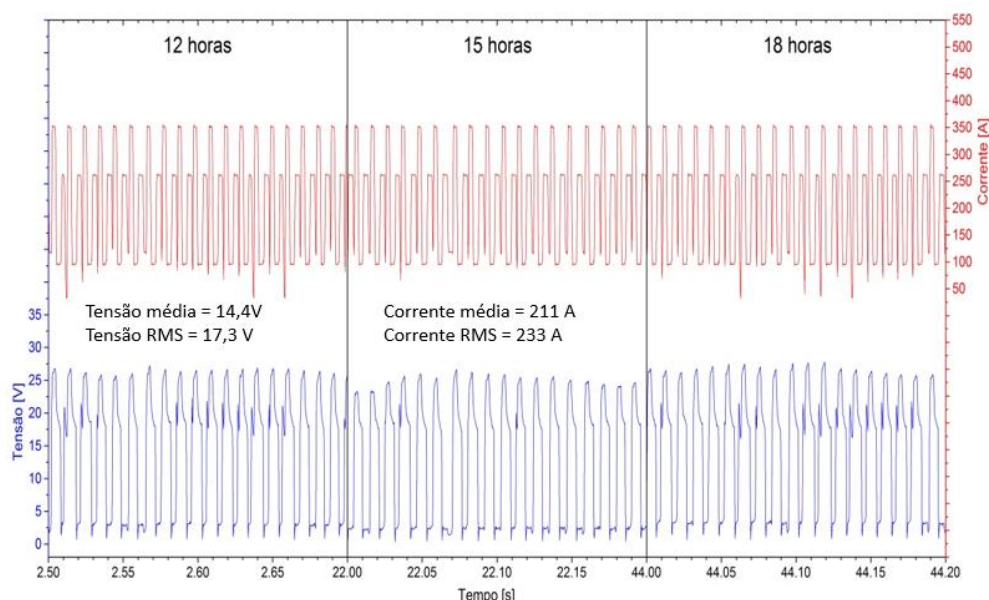


Figura 74. Oscilograma do passe de raiz do teste Raiz\_CMT\_1

## **6.2.Determinação dos parâmetros para o passe de enchimento**

Com a obtenção de passes de raiz visualmente adequados a partir dos parâmetros determinados em tubo no item anterior para os quatro processos avaliados, serão apresentados agora os ensaios para determinação dos parâmetros para os passes de enchimento.

Como o objetivo desse levantamento de parâmetros também concerne na aplicação desses resultados em campo, cada junta soldada foi executada com o mesmo processo/fonte, ou seja, para o processo GMAW convencional, tanto a raiz, quanto o enchimento foram feitos com este processo. Para o STT, tanto a raiz, quanto o enchimento também foram feitos somente com este processo, e assim por diante. Destaca-se que é possível soldar uma junta alterando-se os processos entre raiz e enchimento, por exemplo, executando-se a raiz com RMD e o enchimento com CMT. Entretanto, como a tocha do CMT é dedicada ao processo, caso se deseje fazer o passe de raiz com o CMT, e o enchimento com o STT, por exemplo, deve-se substituir a tocha de soldagem, além de trocar todo o “aparato de soldagem” para outra fonte assim como gás, arame, etc. Por este motivo é que se soldou no enchimento com o processo CMT a raiz oriunda do processo CMT e assim por diante. No entanto, para a realização dos testes em um laboratório de soldagem, não se realizava uma raiz e em seguida um enchimento, visto que se estava trabalhando no levantamento de parâmetros. Assim, realizou-se com cada um dos quatro processos, uma determinada quantidade de passes de raiz, para em seguida determinar os parâmetros de enchimento. Ou seja, para a determinação dos parâmetros de enchimento com o processo convencional, utilizavam-se como base os passes de raiz realizados pelo processo convencional e assim por diante. Nota-se que com esta metodologia inicialmente aplicada, para cada solda de enchimento, foi necessário soldar uma raiz para servir como um “corpo de solda”. Isto dificultou e tomou muito tempo para a realização dos testes. Contudo, serviu também para demonstrar a robustez dos parâmetros encontrados para a raiz, dada a quantidade de soldas repetidas com o mesmo parâmetro.

### 6.2.1. Passe de enchimento para o processo convencional

O primeiro teste para o passe de enchimento (Enchi\_conv\_1 – Tabela 13) para o processo convencional utilizou os parâmetros do passe de raiz obtido na Tabela 9. As diferenças consistem no valor da velocidade de soldagem que foi calculada para o preenchimento correto da junta (em função da altura do passe de raiz) e no valor da amplitude de tecimento que passou de 3,0 para 4,0 mm.

Neste primeiro teste houve o escorrimento na vertical descendente a ponto de pingar metal líquido no chão. O cordão ficou extremamente largo na vertical. O reforço de face na plana e sobrecabeça também foi excessivos. Isto indica que a quantidade de material a ser depositado no enchimento e calculada inicialmente ficou acima do necessário. A relação  $V_a/V_s$  foi diminuída para o teste seguinte, aumentando-se a velocidade de soldagem em 20%. Para se evitar o escorrimento, a tensão foi diminuída para 18 V e a DBCP para 15 mm. Realizado o teste, continuou-se observando escorrimento na vertical, embora os reforços nas posições plana e sobrecabeça tenham melhorado.

Para os testes Enchi\_conv\_3 e Enchi\_conv\_4, decidiu-se avaliar o efeito da indutância sobre a geometria final do cordão. No primeiro teste ajustou-se indutância igual a 10% e no segundo igual a 90%. Observou-se que com 90%, a quantidade de respingos aumentou e o arco ficou muito mais estalado aparentando maior instabilidade de curtos. Ambos cordões apresentaram problemas de escorrimento na vertical. Optou-se por manter nos testes seguintes a indutância em 40% assim como utilizado nos testes da raiz.

Tabela 13. Parâmetros utilizados para passe de enchimento (Convencional)

Enchimento em tubo (Convencional)	$U_{reg}$ [V]	$V_{alm_{reg}}$ [m/min]	$V_{s_{real}}$ [cm/min]	$V_a/V_s$	Indutância [%]	A.t. [mm]	Freq. Tec. [Hz]	Inclinação da tocha	DBCP [mm]
Enchi_conv_1	21	5,0	21,0	23,8	40	4,0	2,2	0°	18
Enchi_conv_2	18	5,0	25,2	19,8	40	4,0	2,6	0°	15
Enchi_conv_3	18	5,0	25,2	19,8	10	4,0	2,6	0°	15
Enchi_conv_4	18	5,0	25,2	19,8	90	4,0	2,6	0°	15
Enchi_conv_5	18	5,0	25,2	19,8	40	4,0	2,6	0°	12
Enchi_conv_6	18	4,5	18,9	23,8	40	4,0	2,0	15°	12
Enchi_conv_7	18	4,0	16,8	23,8	40	4,0	1,8	15°	12
Enchi_conv_8	18	3,5	14,8	23,6	40	4,0	1,5	15°	12
Enchi_conv_9	17	3,5	17,8	19,7	40	4,0	1,9	15°	12
Enchi_conv_10	18	3,5	21,0	16,7	40	4,0	2,2	15°	12

No teste Enchi\_conv\_5, diminuiu-se a DBCP para 12 mm. Ainda houve escorrimento na vertical e a face do cordão ficou muito projetada na sobrecabeça. Para os três testes seguintes diminui-se a velocidade de alimentação para 4,5 m/min, 4,0 m/min e 3,5 m/min e inclinou-se a tocha em 15° puxando. Ainda se observou escorrimento na vertical em todos estes testes. Manteve-se neles a tensão igual a 18V, mesmo diminuindo a velocidade de alimentação.

Para o teste Enchi\_conv\_9, optou-se por diminuir a tensão para 17 V e aumentar a velocidade de soldagem em 20%. Além de escorrimento, observou-se maior instabilidade nos curtos. Em seguida, retornou-se a tensão para 18 V e aumentou-se ainda mais a velocidade de soldagem, uma vez que em virtude dos valores e corrente já terem diminuído bastante, não se pode mais diminuir a velocidade de alimentação. O resultado surtiu efeito. O cordão visualmente parece adequado com uma boa regularidade dos curtos-circuitos. Na Figura 75, está representado o oscilograma do passe de enchimento do teste Enchi\_conv\_9. Chama-se a atenção para o baixo valor de corrente obtido. Outro ponto que merece destaque é o tempo gasto para a realização da solda. Na raiz o tempo gasto foi de aproximadamente 50 s. Já para o enchimento, o tempo foi quase o dobro, como se pode ver no oscilograma.

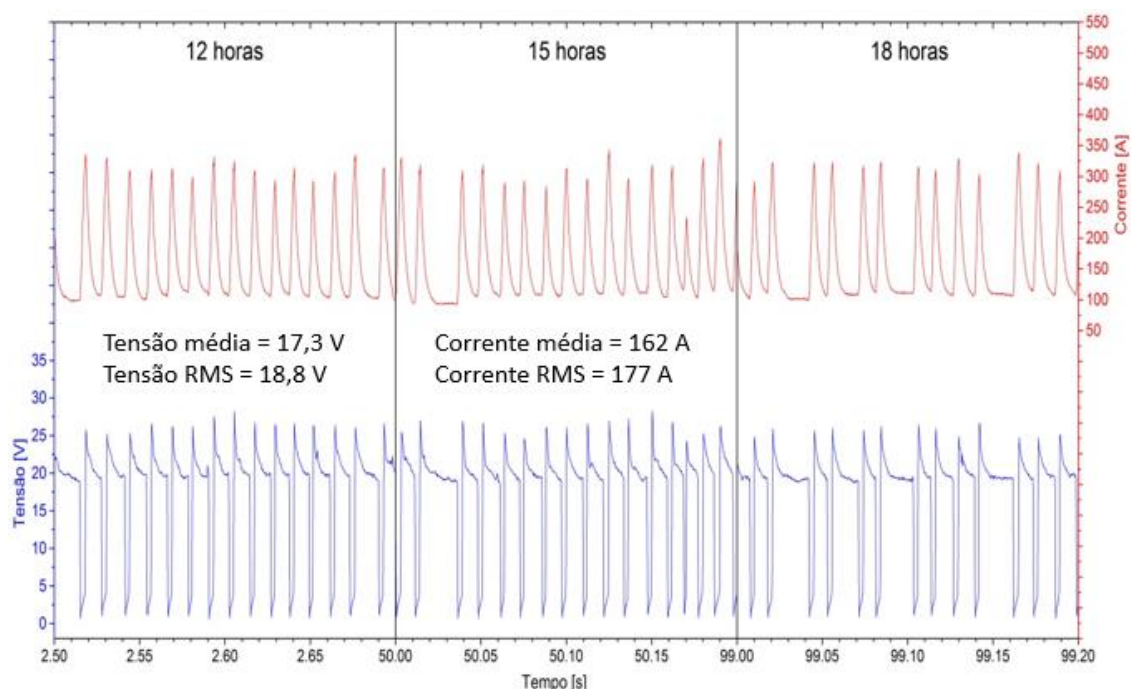


Figura 75. Oscilograma do passe de enchimento do teste Enchi\_conv\_9

### 6.2.2. Passe de enchimento para o processo STT

Nos testes para o passe de enchimento com o processo convencional, observou-se que a DBCP de 12 mm e a condição de 15° puxando apresentou os melhores resultados. Com isso, todos os testes do STT, CMT e RMD iniciaram com estes valores. Por este motivo, houve uma diminuição dos testes necessários para se encontrar um valor adequado à soldagem para os processos controlados.

O primeiro teste para o enchimento iniciou com o mesmo parâmetro do passe de raiz (Tabela 10). Neste primeiro teste observou-se escorrimento na vertical devido ao comprimento do arco relativamente elevado, mesmo com a diminuição da DBCP.

No teste seguinte diminuiu-se a velocidade de alimentação e ajustou-se  $I_p$  e  $T_{out}$  de forma a diminuir o comprimento do arco através da diminuição da tensão média. No entanto, a tensão média aferida ficou muito baixa (~13,71 V) e a face do cordão ficou muito côncava na posição plana. Com novas alterações em  $I_p$  e  $T_{out}$ , observou-se no teste Enchi\_STT\_3 um ligeiro aumento na tensão média (~14,4 V) que proporcionou um cordão na plana ficou melhor, mas continuou escorrendo na vertical.

Por este motivo, no Enchi\_STT\_4, reduziu-se a velocidade de alimentação para 4,0 m/min e proporcionalmente a de soldagem. A solda visualmente ficou adequada. O reforço na sobrecabeça, vertical e plana ficaram muito parecidos embora levemente acima do recomendado. A largura do cordão ficou no limite nas três posições. Para diminuir o reforço, deve-se andar mais rápido para a mesma alimentação de arame. Desse modo, para o teste Enchi\_STT\_5, aumentou-se a velocidade de soldagem em 10%. Com isso, o reforço da plana e da vertical passaram no gabarito. Na sobrecabeça o reforço da face ainda ficou levemente maior que o recomendado. Apesar disso, o cordão no geral parece bem adequado.

Por fim, houve um esforço em aumentar ainda mais a alimentação e, consequentemente a velocidade de soldagem (Enchi\_STT\_6). No entanto, embora este teste tenha alcançado resultados aparentemente satisfatórios, observou-se uma maior instabilidade do arco estando o cordão na iminência de escorrimento na vertical. Por este motivo, optou-se por selecionar o Enchi\_STT\_5 como o parâmetro para o enchimento no STT uma vez que se apresentou ser mais robusto e repetível.

Na Tabela 14, está indicado em amarelo o teste que visualmente deu certo, mas que foi melhorado para o indicado em vermelho (Enchi\_STT\_5), como forma de melhorar a identificação dos resultados.

Tabela 14. Parâmetros utilizados para passe de enchimento (STT)

Enchimento em tubo (STT)	$I_b$ [A]	$I_p$ [A]	$T_{out}$	$Valim_{reg}$ [m/min]	$V_{s_{real}}$ [cm/min]	$V_a/V_s$	A.t. [mm]	Freq. Tec. [Hz]
Enchi_STT_1	130	350	10	5,75	31,0	18,5	4,0	3,2
Enchi_STT_2	100	320	5	5,0	27,0	18,5	4,0	2,8
Enchi_STT_3	100	340	8	5,0	27,0	18,5	4,0	2,8
Enchi_STT_4	100	320	8	4,0	22,0	18,2	4,0	2,3
Enchi_STT_5	100	320	8	4,0	24,0	16,7	4,0	2,5
Enchi_STT_6	110	330	8	4,5	27,0	16,7	4,0	2,8

No oscilograma do teste Enchi\_STT\_5 (Figura 76), observa-se que a corrente média, assim como no convencional também obteve baixo valor médio. Observa-se ainda a boa regularidade de curtos.

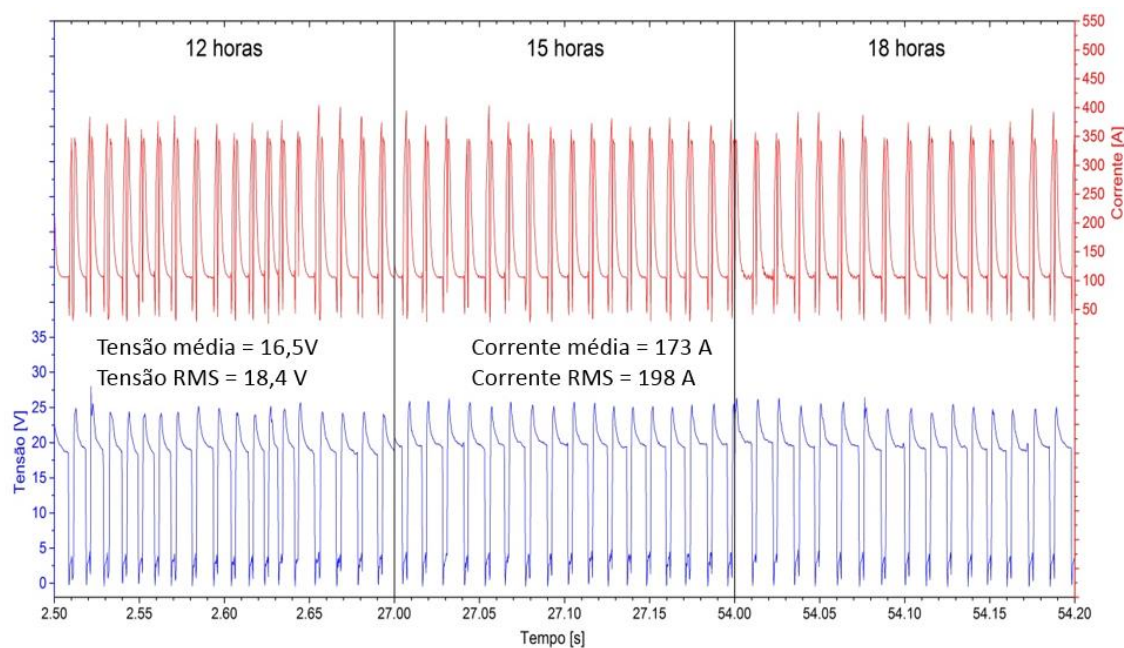


Figura 76. Oscilograma do passe de enchimento do teste Enchi\_STT\_5

### 6.2.3. Passe de enchimento para o processo RMD

Os testes para o passe de enchimento com o RMD, se iniciaram assim como no convencional e nos outros processos com os parâmetros adequados do passe de raiz. Apesar de se ter conseguido completar o cordão, houve escorrimento na vertical e o reforço da face na sobrecabeça ficou excessivo para o teste Enchi\_RMD\_1.

Para o próximo teste (Enchi\_RMD\_2) arredondou-se o valor de velocidade de alimentação para 5,0 m/min diminuindo também o valor do trim. Com isso, a tensão média caiu e evitou o escorrimento na vertical, mas acabou por aumentar o reforço na posição sobrecabeça.

Seguindo o raciocínio realizado para os outros processos, no teste Enchi\_RMD\_3 reduziu-se a velocidade de alimentação de arame para 4,0 m/min, alterando-se apenas a velocidade de soldagem proporcionalmente. Apesar de uma leve tendência de escorrimento ainda na vertical uma vez que o comprimento do arco se elevou (diminuição da velocidade de alimentação de arame), este teste foi repetido várias vezes e se mostrou robusto o suficiente devido sua repetitividade. Na Tabela 15 está indicado o teste eleito como modelo para a realização do passe de enchimento com o RMD.

Tabela 15. Parâmetros utilizados para passe de enchimento (RMD)

Enchimento em tubo (RMD)	Trim	Arc Control	Valim <sub>reg</sub> [m/min]	V <sub>Sreal</sub> [cm/min]	V <sub>a</sub> /V <sub>s</sub>	A.t. [mm]	Freq. Tec. [Hz]
Enchi_RMD_1	75	25	5,20	32,0	16,3	4,0	3,3
Enchi_RMD_2	60	25	5,0	30,0	16,7	4,0	3,1
Enchi_RMD_3	60	25	4,0	24,0	16,7	4,0	2,5

Pela Figura 77, pode-se observar os maiores valores de corrente obtidos (média e RMS) em relação ao processo convencional e STT.



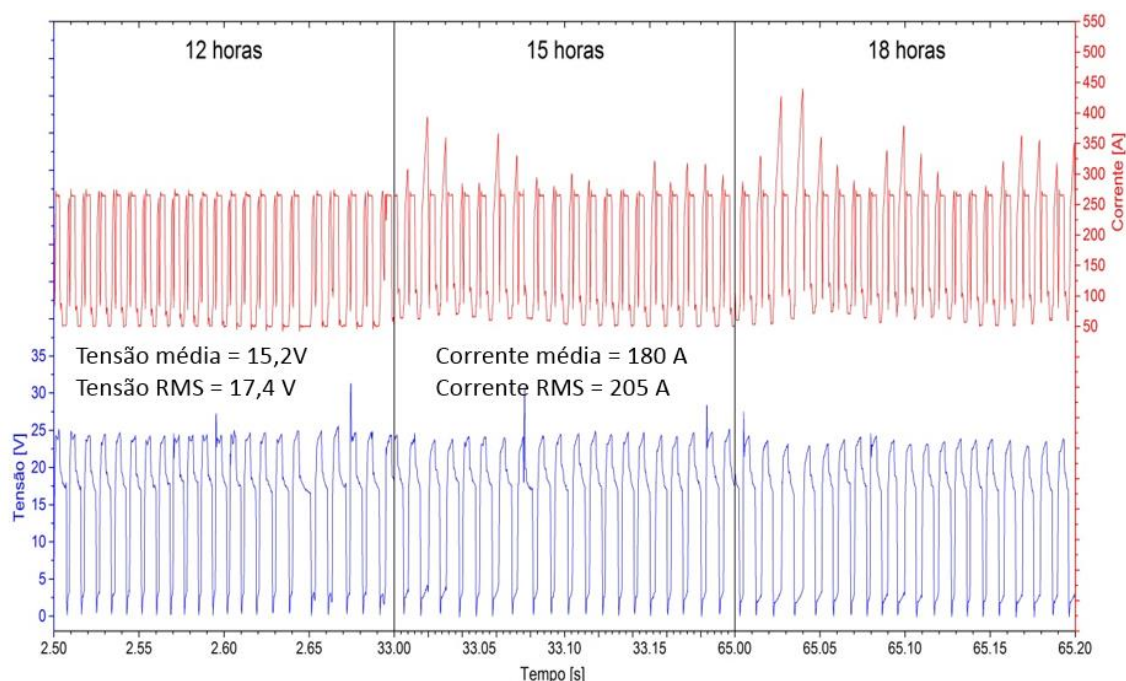


Figura 77. Oscilograma do passe de enchimento do teste Enchi\_RMD\_3

#### 6.2.4. Passe de enchimento para o processo CMT

Para o passe de enchimento com o CMT, o primeiro teste Enchi\_CMT\_1 foi realizado com o mesmo parâmetro do obtido para o passe de raiz. Houve escorrimento na posição vertical. Observou-se ainda um cordão com pouco reforço em todas as posições dando indícios de que a velocidade de alimentação tenha sido menor que a desejada. Ou seja, embora com pouco material adicionado, ainda se teve escorrimento na vertical.

Para o próximo teste (Enchi\_CMT\_2) optou-se por diminuir a velocidade de alimentação para 4,5 m/min, havendo ainda um pequeno escorrimento na vertical. Assim, diminuiu-se ainda mais o valor da velocidade de alimentação de arame para 4,0 m/min, no teste Enchi\_CMT\_3. Com este teste foi possível obter um cordão visualmente adequado que, embora sem escorrimento, ficou com um reforço muito pequeno na plana e na vertical.

Como já se tinha notado que aparentemente pouco material tinha sido adicionado, reduziu-se a velocidade de soldagem para aumentar a área de seção no teste Enchi\_CMT\_4. Muito embora esta decisão implique em uma poça de soldagem maior



(o que poderia favorecer o escorrimento), não houve escorrimento e o cordão do teste Enchi\_CMT\_4 ficou visualmente adequado.

É interessante notar que diferentemente dos melhores resultados para o passe de enchimento obtido com os três processos citados nos itens anteriores que obtiveram uma relação de  $V_a/V_s$  igual aproximadamente de 16,8, no CMT esta relação ficou em 20. Os valores de velocidade de alimentação medidos com o encoder apresentaram ligeira diferença entre o valor desejado (Tabela 16) e o valor real mas não o suficiente para tamanha diferença na relação  $V_a/V_s$ . Com isso, associa-se esta diferença à menor velocidade de soldagem utilizada.

Tabela 16. Parâmetros utilizados para passe de enchimento (CMT)

Enchimento em tubo (CMT)	Parâmetro comp. do arco	Controle dinâmico	Valim <sub>desej</sub> [m/min]	Valim <sub>reg</sub> [m/min]	V <sub>sreg</sub> [cm/min]	V <sub>a</sub> /V <sub>s</sub>	A.t. [mm]	Freq. Tec. [Hz]
Enchi_CMT_1	25	2,5	5,2	6,0	31,0	16,8	4,0	3,2
Enchi_CMT_2	25	2,5	4,5	5,1	27,0	16,7	4,0	2,8
Enchi_CMT_3	25	2,5	4,0	4,2	24,3	16,5	4,0	2,5
Enchi_CMT_4	25	2,5	4,0	4,2	20,0	20,0	4,0	2,1

Assim como observado nos testes com o RMD, o valor de corrente (média e RMS) no CMT também foi mais elevado que no convencional e no STT. Chama-se a atenção mais uma vez para a grande regularidade de curtos no oscilograma do CMT.

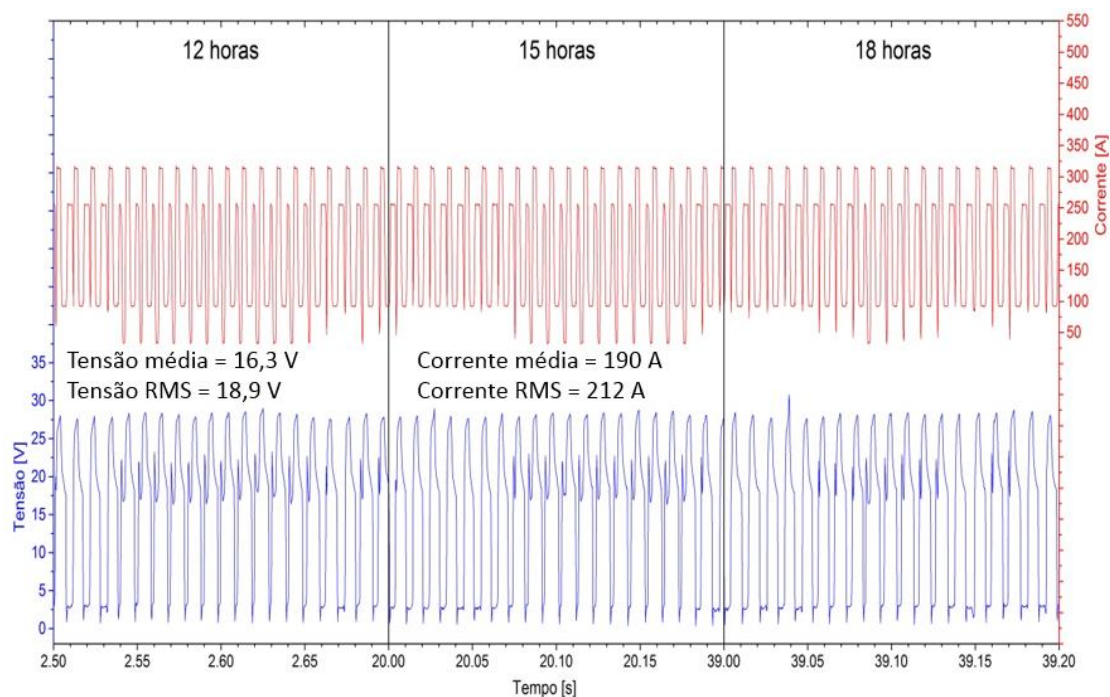


Figura 78. Oscilograma do passe de enchimento do teste Enchi\_CMT\_4

### 6.3. Resultado dos Ensaios Mecânicos e Macrografias

Após realização dos passes de raiz e enchimento para os quatro processos avaliados, são apresentados neste item os resultados dos ensaios mecânicos e macrografias para os cordões obtidos. Apenas com a finalidade de se facilitar a visualização, na Tabela 17 são apresentados um resumo com os ensaios escolhidos para análise neste item.

Tabela 17. Tabela resumo para soldagem sem variação de parâmetros

Processo	Raiz / enchimento	Parâmetros									
		U <sub>reg</sub> [V]			Val <sub>im,reg</sub> [m/min]	Vs <sub>real</sub> [cm/min]	I <sub>médio</sub> [A]	I <sub>RMS</sub> [A]	U <sub>médio</sub> [V]	U <sub>RMS</sub> [V]	
Convencional	Raiz_conv_4	19			5,00	31	212	230	19,4	20,1	
	Enchi_conv_10	18			3,50	21	162	177	17,3	18,8	
STT		Ib [A]	Ip [A]	Tout							
	Raiz_STT_1	130	350	10	5,75	35	220	246	15,4	17,4	
	Enchi_STT_5	100	320	8	4,00	24	173	198	16,5	18,4	
RMD		Trim		Arc Control							
	Raiz_RMD_1	75		25		5,20	32	223	238	16,6	19,1
	Enchi_RMD_3	60		25		4,00	24	180	205	15,2	17,4
CMT		Parâmetro comp. do arco		Controle dinâmico							
	Raiz_CMT_1	25		2,5		5,20	31	211	233	14,4	17,3
	Enchi_CMT_4	25		2,5		4,0	20	190	212	16,3	18,9

A Figura 79 apresenta as macrografias obtidas para cada uma das posições de soldagem (12 horas – plana, 15 horas – vertical descendente e 18 horas – sobrecabeça) realizando-se cortes transversais nos cordões de solda e com embutimento, lixamento (até lixa #1200) e ataque com Nital a 2%. Por estas imagens, é possível visualizar que somente nos processos GMAW convencional e STT houve falta de fusão (destacada em vermelho) e de penetração (destacada em azul) nas posições 12 e 15 horas. Em amarelo destacam-se porosidades. Para os demais processos e posições não foi possível visualizar descontinuidades. Esta observação resulta da necessidade de se ter utilizado menores níveis de corrente para os processos convencional e STT, o que induziu a esses defeitos.

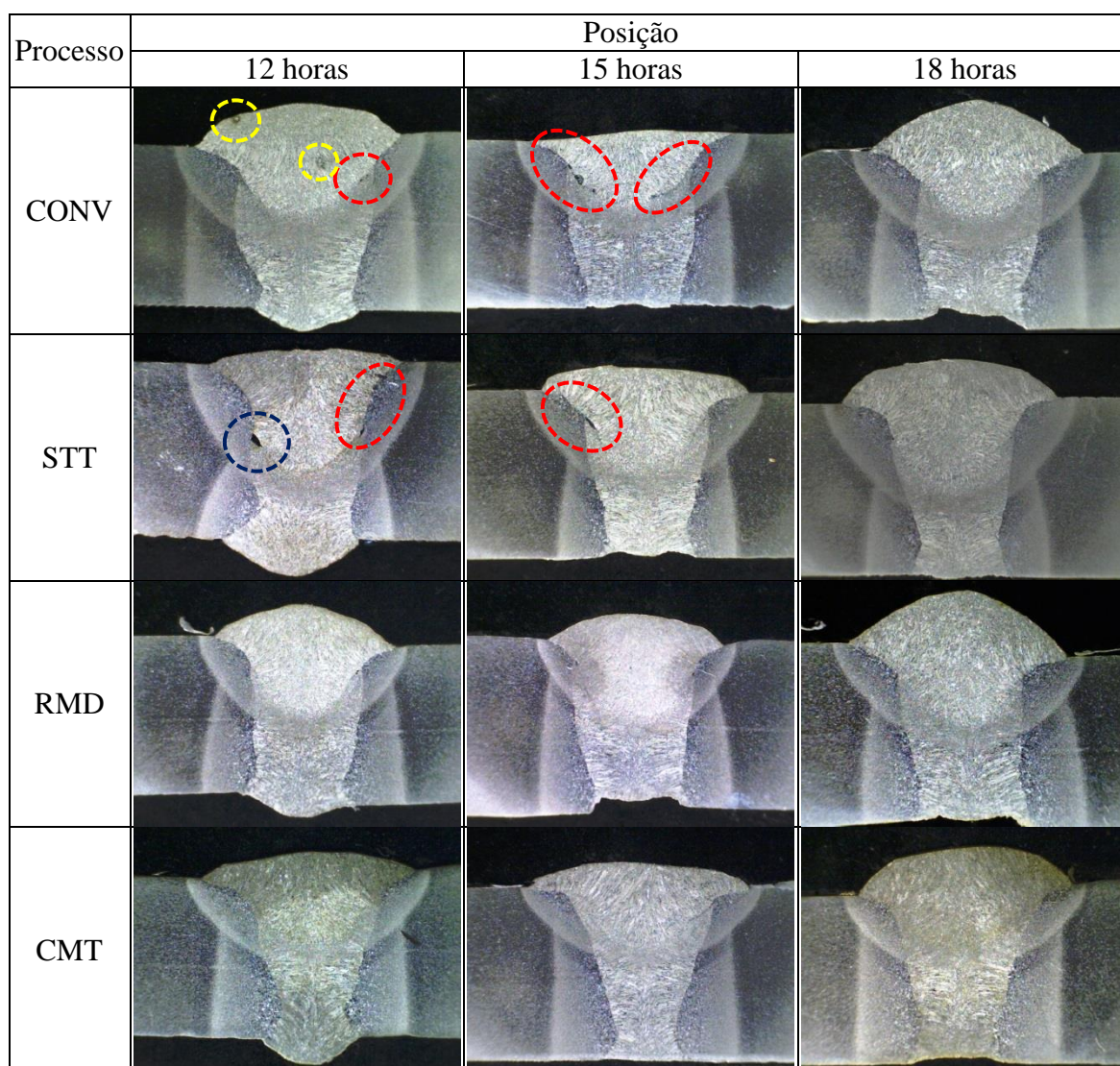


Figura 79. Ensaio macrográfico dos cordões obtidos sem variação de parâmetros (considerar a espessura da chapa de 8 mm)

De acordo com a API 1104 (2010), falta de fusão deve ser considerado um defeito quando seu comprimento exceder a 25 mm ou quando o somatório de todas as ocorrências superar os 25 mm (ou 8%) ao longo de uma solda com 300 mm. Assim, tornar-se-ia necessário realizar, por exemplo, ensaio por Ultrassom para verificar a extensão da falta de fusão. Por outro lado, destaca-se que o objetivo do trabalho é levantar condições paramétricas apropriadas sem a existência de defeitos. Portanto, consideraram descartados todos os ensaios em que as macrografias apresentarem falta de fusão lateral ou entre passes, independente da sua extensão.

Além da falta de fusão, é possível notar dois poros na macrografia da posição 12 horas para o processo convencional (destacado em amarelo). Entretanto, como descrito na API 1104 (2010), porosidade não pode exceder individualmente a 3 mm. Neste caso, percebe-se visualmente que os poros em questão não possuem dimensão individual maior que 3 mm, não sendo portanto considerados um defeito para esta seção transversal. Além do mais, em outras amostras estes poros não foram visualizados e como estão dentro do limite estabelecido pela API 1104 (2010), foram considerados, portanto, uma descontinuidade e não um defeito.

Destaca-se nestas imagens, a boa qualidade do passe de raiz, onde a concavidade de raiz (como por exemplo na posição 15 h do RMD) existente em alguns casos está de acordo com a API 1104 (2010), onde a concavidade da raiz da solda é aceitável para qualquer comprimento, desde que não haja mordeduras e falta de concordância (concentrador de tensões). Considera-se que esta abordagem da norma em aceitar a concavidade da raiz da solda seja adequada, pois como será mostrado a seguir quando das análises da Figura 82 (ensaio de tração) e Figura 84 (ensaio de dobramento), mesmo ocorrendo estas descontinuidades na raiz mostradas na Figura 79, os ensaios de tração e dobramento de raiz foram todos aprovados.

Por outro lado, seria possível buscar melhorias no projeto da junta de forma a se reduzir esta concavidade da raiz. Por exemplo, aumentando-se a abertura da raiz ou aumentando-se o ângulo do chanfro. Entretanto, o objetivo foi estabelecer condições paramétricas para a junta de topo com chanfro em V, em específico destacada na Figura 19.

Embora o passe de raiz seja o mais difícil e crítico, os resultados apresentados demonstraram que para um único conjunto de parâmetros aplicados a chanfro estreito, a soldagem do passe de enchimento se tornou mais difícil de execução.

Embora não se tenha obtido resultados satisfatórios para o processo STT, Nascimento (2015) soldando a mesma junta obteve resultados satisfatórios com os dados da Tabela 18. Com estes parâmetros apresentados ele conseguiu obter um cordão livre de defeitos.

Tabela 18. Parâmetros adequados para enchimento com o STT obtido por Nascimento (2015)

Processo	enchimento	Parâmetros									
		I <sub>b</sub> [A]	I <sub>p</sub> [A]	T <sub>out</sub>	Inclinação da tocha	Valim <sub>reg</sub> [m/min]	V <sub>sreal</sub> [cm/min]	I <sub>médio</sub> [A]	I <sub>RMS</sub> [A]	U <sub>médio</sub> [V]	U <sub>RMS</sub> [V]
STT	teste 17	100	350	8	15°	4,4	22,3	200	229	15,2	17,3

Observa-se que os níveis de corrente obtidos por Nascimento (2015) são superiores aos obtidos com o teste Enchi\_STT\_5 (Tabela 17) que apresentou defeitos (Figura 79), mas muito semelhantes aos testes com o RMD e o CMT que não apresentaram defeitos. O que Nascimento (2015) conseguiu foi aumentar os níveis de corrente sem o efeito de escorrimento (ou a tendência) observado neste trabalho no teste Enchi\_STT\_6 (Tabela 14), por exemplo. Neste teste, obteve-se níveis de corrente ( $I_m = 198$  A e  $I_{RMS} = 222$  A) e tensão ( $U_m = 16$  V e  $U_{RMS} = 18,1$  V) muito semelhantes aos obtidos por Nascimento, mas foi descartado por ser aparentemente menos robusto que o anterior (Enchi\_STT\_5).

No entanto, o teste Enchi\_STT\_5 não se mostrou tão robusto como se esperava já que apresentou defeitos como visto na Figura 79. Como Nascimento (2015) já obteve uma condição robusta para o passe de enchimento com o STT, não há sentido em continuar neste trabalho buscar um envelope robusto ao STT. Por outro lado, embora também tenha realizado muitos testes, Nascimento (2015) também não conseguiu uma condição robusta para o processo convencional. Além disso, Nascimento (2015) ainda afirma que dificilmente se conseguirá uma condição para o passe de enchimento com o convencional soldando-se com um único conjunto de parâmetros ao longo das três posições de soldagem (plana, vertical e sobrecabeça). Isto porque para evitar a falta de fusão na plana, deve-se aumentar a energia nesta posição, mas isto implica em escorrimento na vertical. Este resultado de Nascimento (2015) vem reforçar a necessidade de realizar a variação de parâmetros ao longo da soldagem circunferencial apresentado no Item 5.

Seguindo com os ensaios mecânicos, os ensaios de dureza foram realizados em microindentador Digital Microhardness Tester HVS-1000, com penetrador de piramidal de diamante de 136° de conicidade. As medidas foram realizadas com a movimentação do corpo de prova sobre a bancada do aparelho, com a observação por meio de lente de ampliação de 100 vezes. Foi utilizada uma carga de 4,9 N em 20 segundos de tempo de aplicação. A tomada da dureza foi realizada por meio da observação da impressão no corpo de prova por uma lente de ampliação de 400 vezes. Onze medidas foram tomadas na face superior dos corpos de prova (CP's) a 2 mm da face e onze medidas na face inferior a 2 mm da raiz, em conformidade com as normas ISO 9015-2 (2003) e ISO 6507-1 (2005).

A Figura 80 apresenta os resultados obtidos. Inicialmente foram feitos ensaios somente na face para os CP's referentes aos processos GMAW Convencional na posição 18 horas, STT em 18 horas, RMD em 12 horas e CMT em 15 horas. Estas posições foram tomadas aleatoriamente e pela análise da Figura 80, os valores estão em conformidade e, portanto, refletem o conjunto maior de todas as medições apresentadas neste item. Dada a pequena dispersão entre as medidas, considera-se que não sejam necessárias maiores medições, pois o comportamento é bastante similar para as amostras investigadas.

Para os valores medidos, a maior dureza encontrada foi de 255 HV para o metal de solda no passe de enchimento e a menor de 131 HV<sub>0,5</sub> para o metal de base. Com relação a valores médios, para o passe de raiz, o metal de base apresentou dureza de  $149 \pm 11$  HV<sub>0,5</sub>, a ZAC de  $185 \pm 19$  HV<sub>0,5</sub> e o metal de solda de  $195 \pm 17$  HV<sub>0,5</sub> (em função do revenimento do passe de acabamento). Já para o passe de enchimento, o metal de base apresentou dureza de  $161 \pm 12$  HV<sub>0,5</sub>, a ZAC de  $181 \pm 10$  HV<sub>0,5</sub> e o metal de solda de  $217 \pm 19$  HV<sub>0,5</sub>. Neste sentido, todos estes valores são adequados e inferiores a 350 HV, estabelecido na API 1104 como risco para ocorrência de trinca a frio.



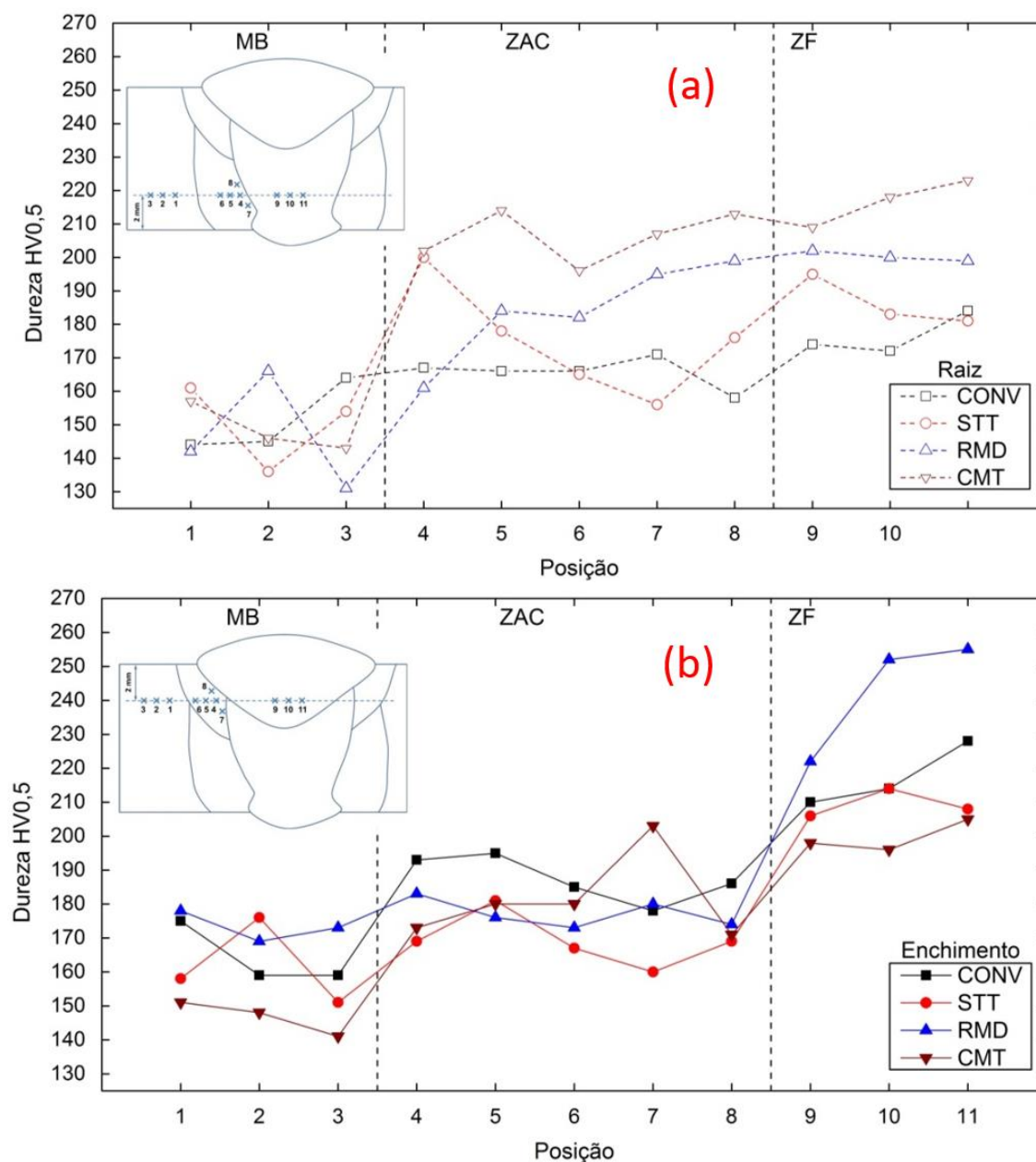


Figura 80. Valores de dureza obtidos para a raiz (a) e enchimento (b)

Para os ensaios de tração uniaxial, utilizou-se máquina universal de ensaios instrumentada da marca Shimadzu, modelo Autograph AG-X, com capacidade de 300 kN, controlada por meio de software Trapezium X, do mesmo fabricante. Os corpos de prova utilizados e suas dimensões se encontram na Tabela 19. Nesta mesma tabela, estão apresentados os valores encontrados para o metal de base para as três amostras retiradas de diferentes regiões do tubo. Ressalta-se que mesmo tendo sido reprovados na macrografia foram realizados ensaios de tração para os processos convencional e STT.

Tabela 19. Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração

Processo	Quadrante	Dimensões [mm]		
		Espessura	Largura	Comprimento Livre
CONV	Superior	7,76	22,2	60
	Inferior	7,59	21,53	60
STT	Superior	7,5	22,84	60
	Inferior	7,56	24,12	60
RMD	Superior	7,82	24,2	60
	Inferior	7,8	24,9	60
CMT	Superior	7,49	21,15	60
	Inferior	7,75	21,66	60
Metal de base	Amostra 1	8,07	25	60
	Amostra 2	8	24,75	60
	Amostra 3	8,05	24,41	60

Após a execução dos ensaios, foram encontrados os resultados de limite de escoamento, tensão máxima e tensão de ruptura apresentados na Tabela 20. Nesta mesma tabela, estão apresentados os valores encontrados para o metal de base para três diferentes amostras retiradas de diferentes regiões do tubo. Destaca-se que os valores nominais do aço API 5L X65, segundo a API 5L (2012) são 450 MPa para o limite de escoamento, 535 MPa para o limite de resistência e 19,6% de alongamento (calculado com base na área de seção transversal de 200 mm<sup>2</sup> do corpo de prova). Embora os valores encontrados estejam abaixo do especificado na norma para os limites de escoamento e resistência, os valores encontrados durante a soldagem são iguais ou superiores ao metal de base. Assim, todas as soldas estão aprovadas com respeito ao ensaio de tração.

Tabela 20. Resultados dos ensaios de tração

Processo	Quadrante	Limite de escoamento [MPa]	Limite de resistência [MPa]	Limite de ruptura [MPa]	Elongamento [%]
CONV	Superior	340,5	436,5	312,4	22,4
	Inferior	332,5	430,4	335	21,8
STT	Superior	346,4	444,4	360,9	21,4
	Inferior	345,9	441,5	356,5	22
RMD	Superior	351,2	442,6	332,1	22
	Inferior	342,3	440,5	339,4	22,6
CMT	Superior	333,8	439,8	329,8	21,6
	Inferior	313,3	406	306,8	21,2
Metal de base	Amostra 1	300	423,2	308	23,5
	Amostra 2	313,6	421,1	309,5	23,5
	Amostra 3	311,1	416,1	304,2	25



A Tabela 3-A da API 5L (2012), reproduzida na Tabela 21, classifica os materiais de acordo com os requisitos mínimos de limites de escoamento e resistência. Comparando-se estes valores com os valores apresentados na Tabela 20 para o metal de base, se pode afirmar que o material analisado comporta-se mais como o API X42 ao invés do X65.

Hashemi (HASHEMI, 2010) em seu trabalho de caracterização de propriedades mecânicas do aço API X65 encontrou como menor limite de escoamento e de resistência entre suas amostras os valores 479 MPa e 582 MPa, respectivamente. Apesar de ter encontrado valores acima do mínimo estabelecido, o referido autor reitera que os valores encontrados estão abaixo dos valores limites (598 MPa e 758 MPa, respectivamente) e portanto adequados.

Com isto, embora os tubos utilizados como base para os testes tenham sido utilizados como sendo X65, pelos resultados apresentados, prova-se do contrário. Contudo, embora o tubo soldado não seja um X65, isto não desacredita os parâmetros encontrados e apresentados na Tabela 17. Neste raciocínio, o valor encontrado do limite de resistência para o tubo soldado (Tabela 20), ainda assim respeita este requisito mínimo (Tabela 21). Deve-se recordar da análise química feita na Tabela 2, onde a composição química reflete àquela de um aço comum ao carbono, que realmente não possuiria maiores propriedades mecânicas.

Tabela 21. Requisitos mínimos do teste de tração. (Adaptado da API 5L, 2012)

Classe de Material (aço)	Limite de escoamento [MPa] (mínimo)	Limite de resistência [MPa] (mínimo)
X42	290	414
X46	317	434
X52	359	455
X56	386	490
X60	414	517
X65	448	531
X70	483	565

Na Figura 81 são mostradas as curvas tensão-deformação obtidas durante os ensaios, separadas para cada processo de soldagem e para posição de retirada do corpo de prova. Destaca-se que no caso dos CP's obtidos pelo CMT, houve pequeno escorregamento da pinça, de onde se nota as rápidas variações na Figura 81-d, mas sem interferência nos resultados. Já a Figura 82 apresenta o aspecto visual de cada corpo de prova após o ensaio e o detalhe de sua respectiva fratura.

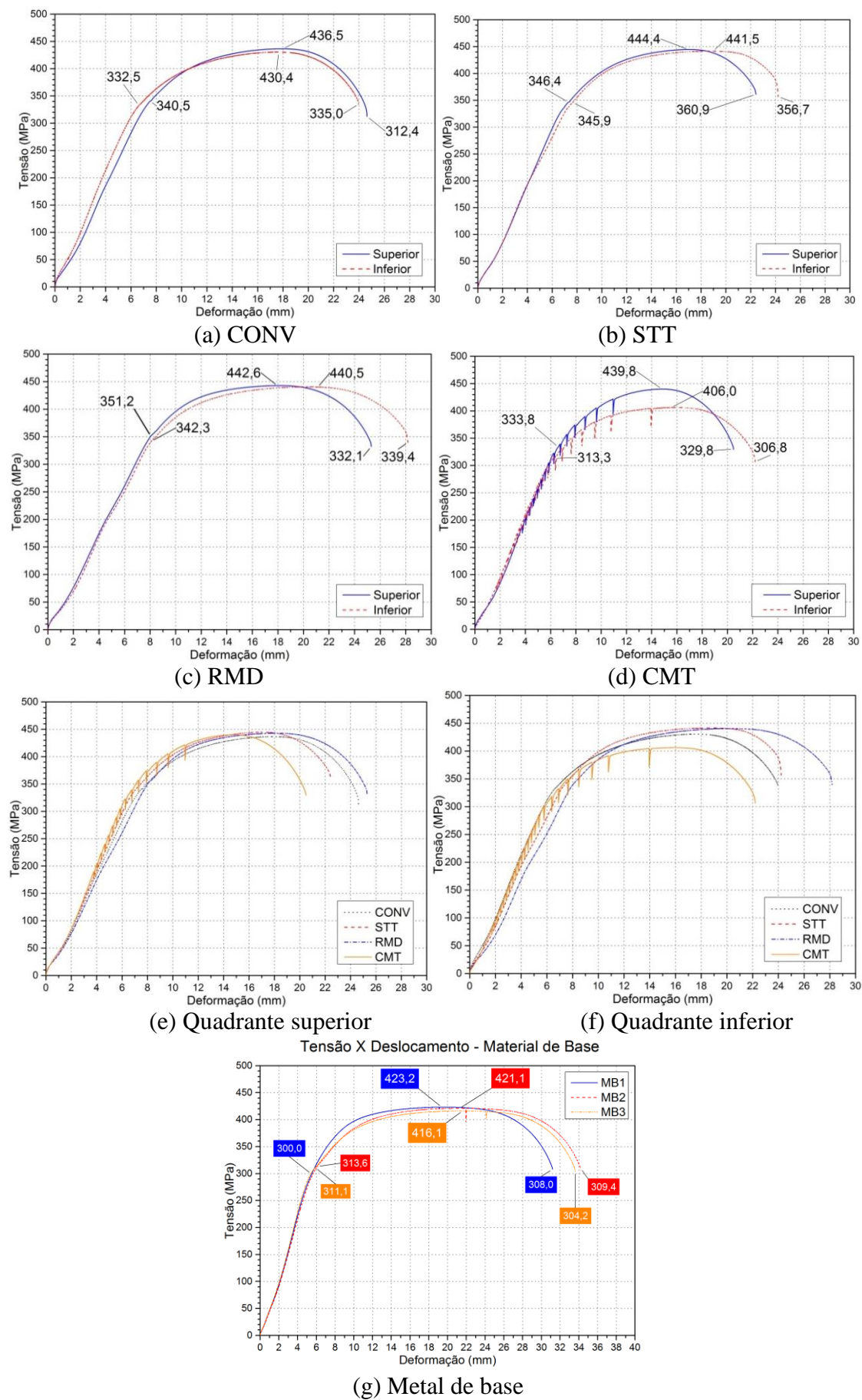


Figura 81. Curvas tensão-deformação para os ensaios de tração uniaxial



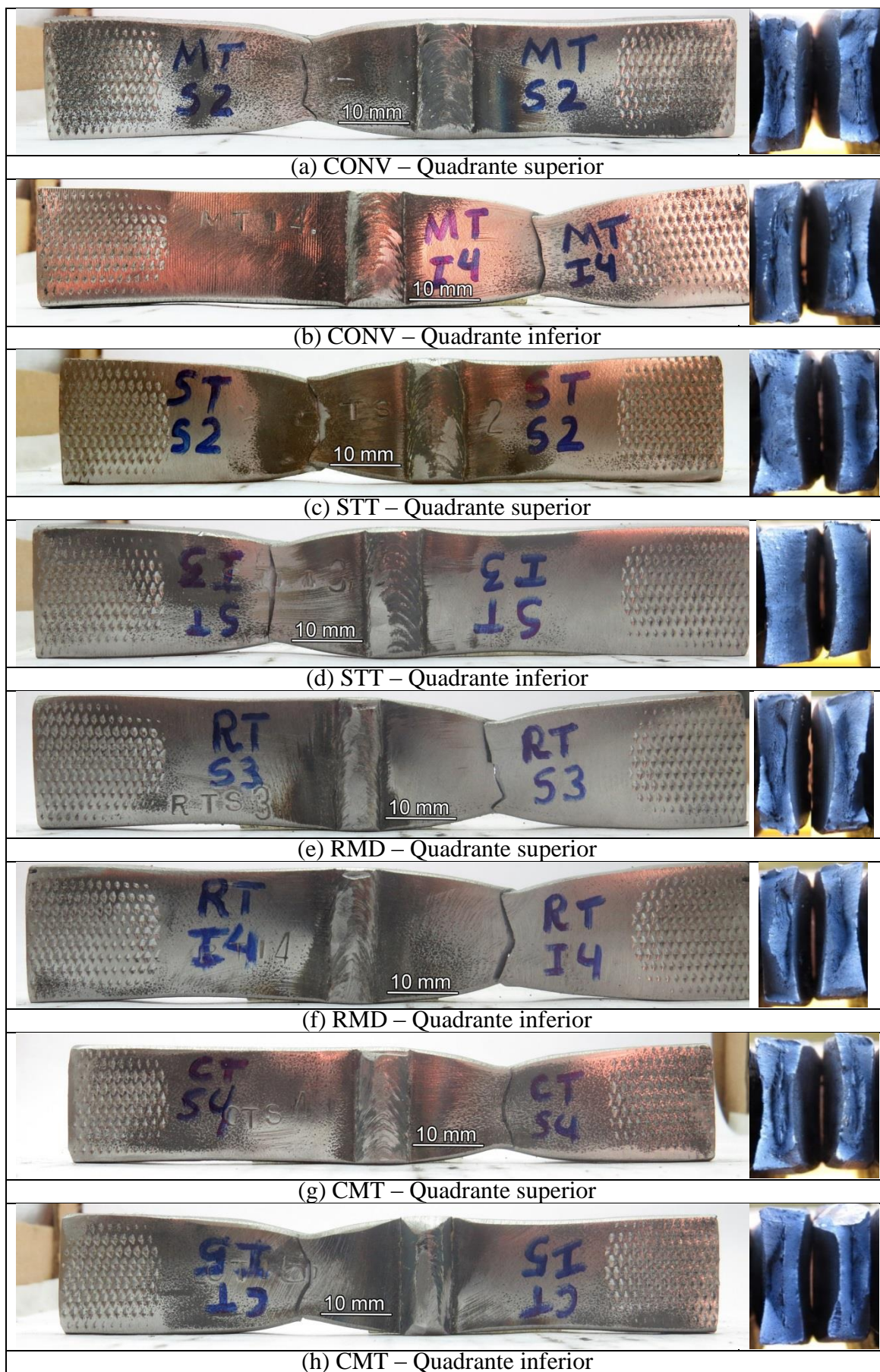


Figura 82. Aspectos visuais dos CP's de tração e de suas fraturas

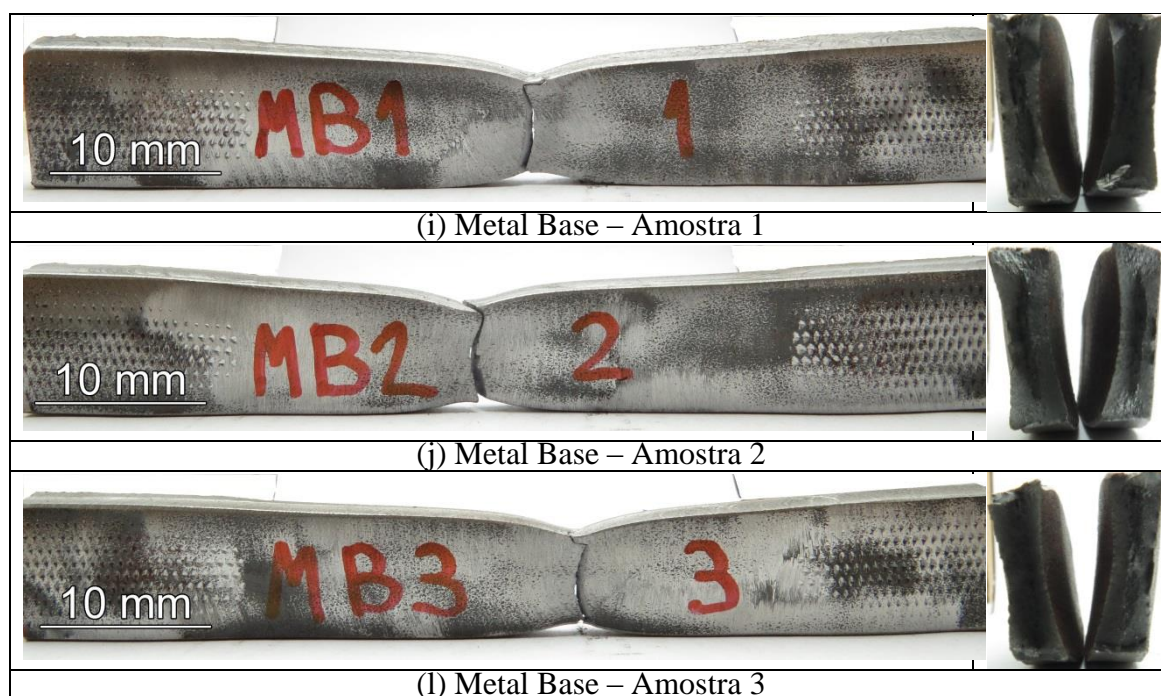


Figura 83. Aspectos visuais dos CP's de tração e de suas fraturas para o metal de base

Todos os corpos de prova avaliados (tanto soldados - Figura 82, como metal de base - Figura 83) sofreram ruptura na região do metal de base fora da região do cordão de solda e da zona termicamente afetada. Sendo assim, todos os cordões de solda avaliados por este ensaio foram aprovados conforme requisitos da norma. É válido ressaltar que os resultados de tensão limite de escoamento, limite de resistência, limite de ruptura e alongamento apresentam valores similares e dentro do esperado pela API 5L (2012).

Neste ponto deve-se destacar que, embora tenha havido falta de fusão para os cordões de solda obtidos pelos processos GMAW convencional e STT, não houve prejuízo para os resultados obtidos pelo ensaio de tração uniaxial.

Com relação aos resultados para o ensaio de dobramento, a Figura 84 apresenta os corpos de prova para cada processo, quadrante (superior ou inferior) e região da solda (face ou raiz). Destaca-se que API 1104 (2010) requer um cutelo de 45 mm de diâmetro, que não havia disponível no laboratório de soldagem da UFU - Laprosolda. Assim, foi utilizado um cutelo de 39 mm de diâmetro. Uma vez que o diâmetro é menor, considera-se adequado, pois o dobramento passa a ser mais severo.

Pela análise da Figura 84, nota-se que todos os CP's dobraram sem trincamento à exceção dos CP's para o dobramento de face inferior no processo convencional e os



dois dobramentos de face (superior e inferior) para o STT, inclusive com fratura para o quadrante inferior deste último. Isto se deve à falta de fusão observada nos ensaios de macrografia, que, embora, não tenham comprometido o ensaio de tração uniaxial, afetaram de forma significativa os resultados dos ensaios de dobramento. Por outro lado, o passe de raiz não apresentou qualquer imperfeição no dobramento de raiz para todos os processos. Assim, considera-se que os parâmetros de soldagem para o passe de raiz sejam adequados para a junta proposta. Esta constatação é de suma importância, pois mesmo ocorrendo possíveis discontinuidades na raiz, como concavidade da raiz da solda apresentada e discutida na Figura 79, os ensaios de dobramento de raiz e tração foram todos aprovados.

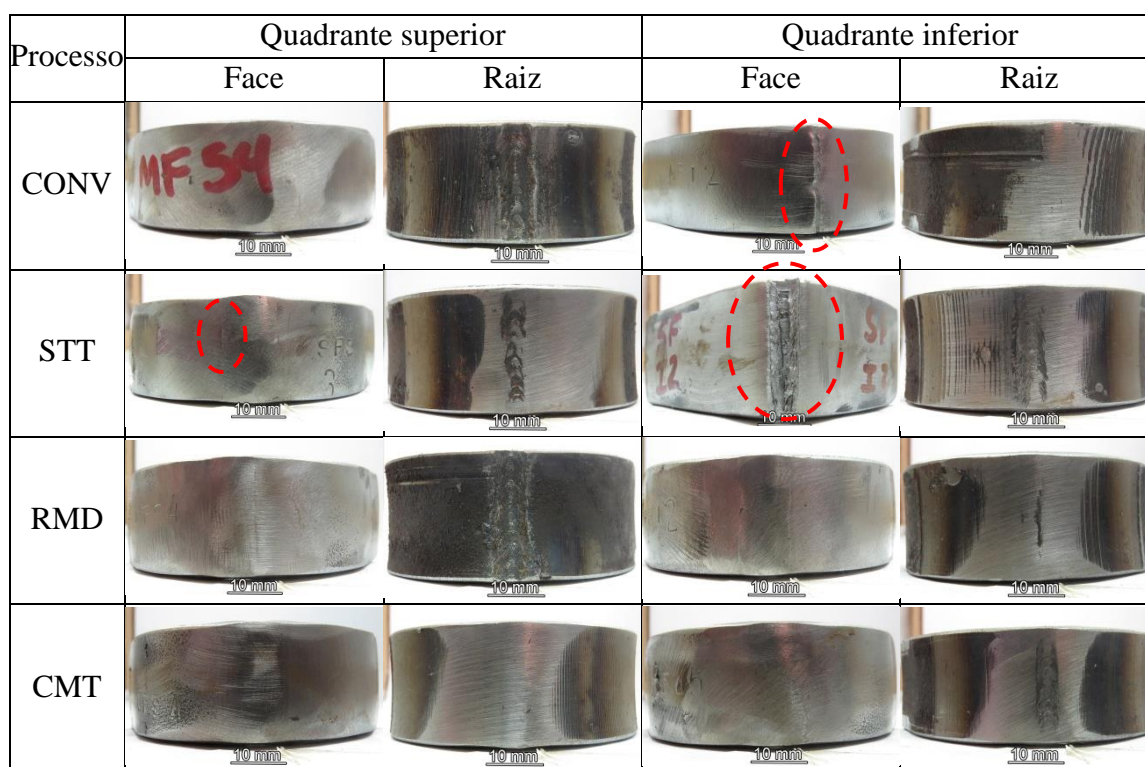


Figura 84. CP's após ensaios de dobramento, com indicações de trincamento.

Já para o ensaio *Nick Break*, a Figura 85 traz as imagens dos CP's após os ensaios. Destaca-se que houve grande dificuldade para rompimento dos CP's, onde foi necessário realizar um entalhe adicional de 1,6 mm de profundidade na face em conformidade com a API 1104 para processo mecanizado. Mesmo com este entalhe adicional o rompimento foi acompanhado pela deformação do CP fora dos entalhes (laterais e adicional de face), o que permite afirmar que há resistência mecânica adequada da junta. Ao se observar a fratura, esta ocorreu de forma dúctil sem

descontinuidades internas. Assim, todos os CP's se encontram aprovados com relação a este ensaio.

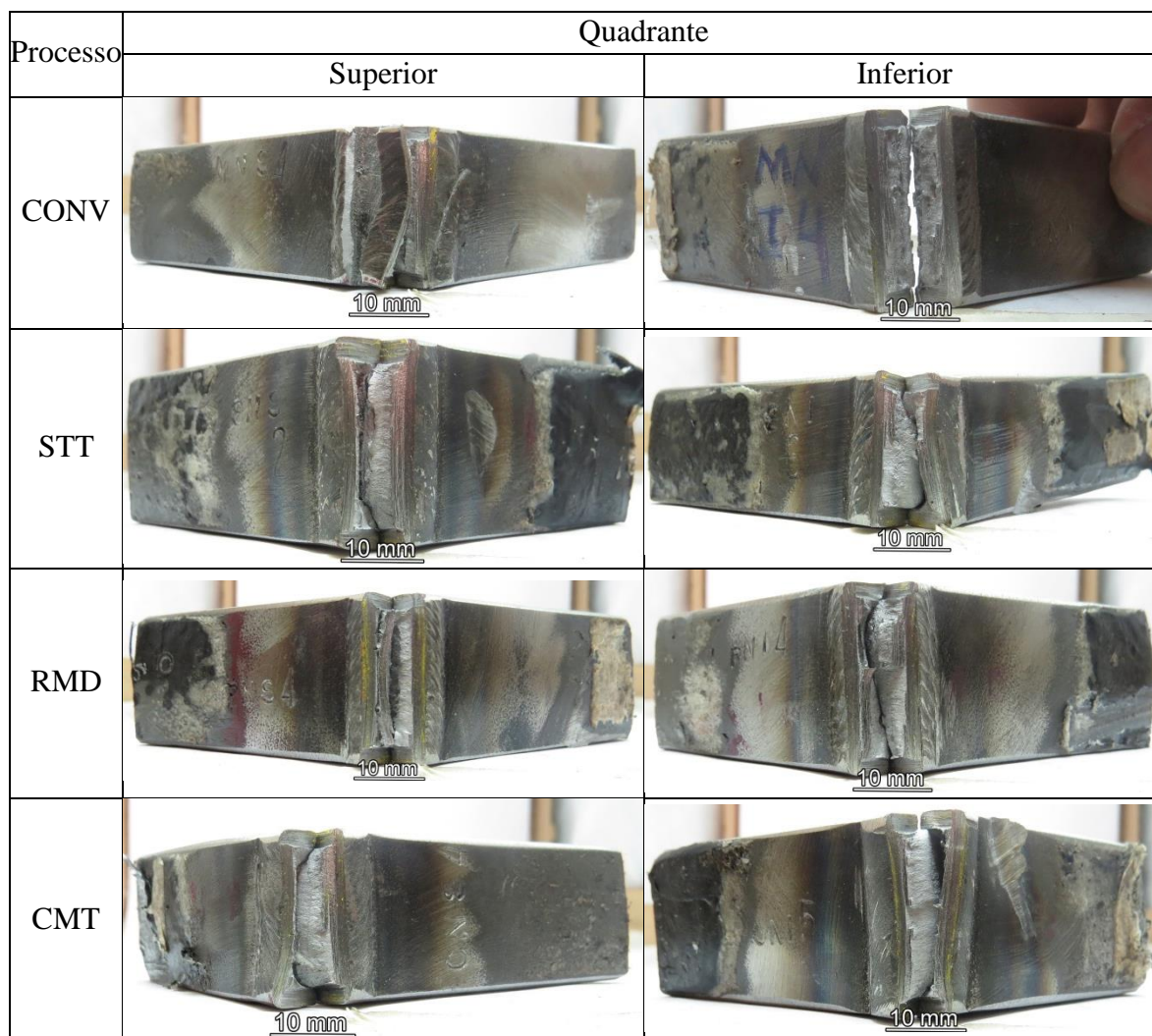


Figura 85. CP's após ensaio *Nick Break*

Para o ensaio Charpy, utilizou-se equipamento Losenhauen, sendo o entalhe feito de tal forma que a propagação da trinca ocorra paralelamente ao eixo do cordão soldado, conforme Figura 86. As dimensões do CP's foram do tipo sub-size, em função da espessura do tubo ser 8,0 mm, menor que os 10 mm requeridos para os CP's full-size especificados na ASTM A370-12 (2012) (CP full-size de dimensões 10 x 10 x 55 mm). Destaca-se que a API 1104 (2010) requer mínimo de 80% da espessura de parede do tubo, o que seria 6.4 mm, neste caso. Assim, num primeiro momento esta foi a mínima espessura buscada. Entretanto, ao se observar a própria ASTM A370-12 (2012) e a ASTM E23-12C (2012), os valores indicados para os CP's sub-size são 2.5, 5.0 ou 7.5 mm (sendo as duas outras dimensões 10 e 55 mm). Assim, neste caso, o ideal seria um

CP de 7.5 mm, que estaria em conformidade com todas estas normas. Entretanto, esta dimensão não foi possível de ser obtida, pois a raiz foi usinada para alinhar os tubos, em função de desvio de circularidade, além do efeito da própria curvatura do tubo. Desta forma, optou-se por seguir as recomendações da API 1104 (CP de 6,4 x 10 x 55 mm) quando possível. Quando não foi possível seguir estas dimensões (quando a raiz necessitou ser demasiadamente usinada em função dos desvios de circularidade do tubo), optou-se por usar um CP de 5,0 x 10 x 55 mm, em respeito às normas da ASTM.

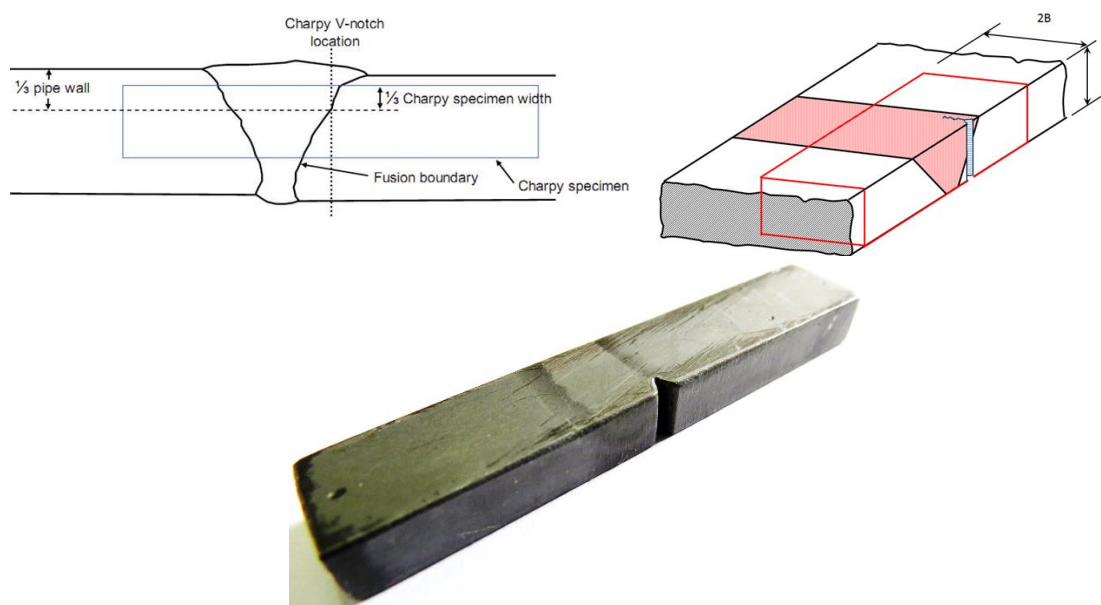


Figura 86. Detalhe dos corpos de prova para ensaio de impacto Charpy com base nas normas API 1104:2010 (esquerda) e ISO 15653:2010 (direita), e exemplo CP (inferior)

Com relação aos requerimentos de tenacidade, a API 1104 (2010) estabelece como mínimo de energia absorvida no impacto o valor de 40 J para um CP full-size. Como CP's sub-size foram utilizados deve-se fazer correlação tanto com relação ao valor da energia absorvida, quanto com relação à temperatura do ensaio em si. Com relação à diferença de área de seção transversal, o valor da energia absorvida é obtido de forma proporcional. Já com relação à temperatura do ensaio, esta deve ser observada uma vez que um CP menor tende a ser mais flexível (deflete mais para uma mesma carga), o que induz ao efeito de tamanho dentro da análise da Mecânica da Fratura. Assim, deve-se reduzir a temperatura do ensaio para “reduzir” esta flexibilidade do CP. Para se calcular o valor da redução da temperatura, diferentes correlações são propostas pela literatura técnica, sendo que a correção apresentada na Equação (5) é a utilizada

neste caso por ser aquela utilizada pela BS 7910 (2005), onde  $\Delta T$  [°C] é o valor a ser reduzido da temperatura originalmente proposta e  $t$  [mm] é a espessura do CP utilizada.

$$\Delta T = 51,4 \cdot \ln \left[ 2 \cdot \left( \frac{t}{10} \right)^{0,25} - 1 \right] \quad (5)$$

Neste caso, a temperatura a ser utilizada foi estabelecida em 0 °C. Assim, o requerimento da energia de impacto é de 40 J à 0 °C. Desta forma, para o CP sub-size de 6,4 mm, o requerimento seria de 25,6 J à -12,2 °C e para o sub-size de 5,0 mm, o mínimo seria de 20 J @ -19,7 °C. Para se atingir ambas temperaturas utilizou-se uma mistura de monoetilenoglicol, álcool etílico e água em proporção calculada em função de seus pontos de fusão para se atingir os valores de temperatura desejados. A temperatura final foi medida com termômetro de contato Extech HD200, oscilando em  $\pm 1,0$  °C.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 22 e em forma gráfica na Figura 87, já corrigidos os efeitos de tamanho. Por estes resultados, nenhum CP apresentou energia absorvida menor que 40 J, conforme especificado na API 1104 (2010), tendo como referência a temperatura de 0 °C. Ou seja, todas as soldas estariam aprovadas do ponto de vista de tenacidade, uma vez que este aço e metal de adição não possuem maiores complexidades para se atingir o requerimento de tenacidade. Entretanto, cabe destacar os menores valores de energia absorvida apresentados pelos CP's obtidos por meio dos processos GMAW convencional e STT, em especial este último. Isto reflete o efeito da falta de fusão e menor capacidade de absorção do impacto.

Além do valor da energia em si, deve-se observar o aspecto da fratura. Assim, a Figura 88 apresenta exemplos de fraturas observadas, que se caracterizam por fratura dúctil na região analisada, o que corrobora os bons resultados de tenacidade. Entretanto, vale a pena destacar as deformações observadas na região do entalhe e propagação da trinca. As imagens do lado esquerdo da Figura 88 não apresentam deformação significativa, ao passo que as imagens do lado direito desta figura demonstram grande deformação antes do rompimento do CP. Em especial as imagens (e) e (f) da Figura 88 demonstram o motivo da maior dispersão dos resultados obtidos para as soldas realizadas pelo processo GMAW convencional. Quando a falta de fusão foi significativa



e presente no CP de Charpy (Figura 88 - e), houve baixa energia absorvida (60 J). Quando não há falta de fusão (Figura 88 - f), a energia absorvida foi para 211 J.

Tabela 22. Resultados do ensaio de impacto Charpy

Processo	Quadrante	Energia absorvida [J]	Energia absorvida média [J]	Desvio-padrão [J]
CONV	Superior	211	149	79
	Superior	60		
	Superior	176		
	Inferior	200	154	57
	Inferior	172		
	Inferior	90		
STT	Superior	115	117	6
	Superior	124		
	Superior	112		
	Inferior	137	120	20
	Inferior	98		
	Inferior	124		
RMD	Superior	230	166	56
	Superior	129		
	Superior	139		
	Inferior	163	189	36
	Inferior	174		
	Inferior	230		
CMT	Superior	191	184	34
	Superior	147		
	Superior	214		
	Inferior	132	194	54
	Inferior	221		
	Inferior	230		

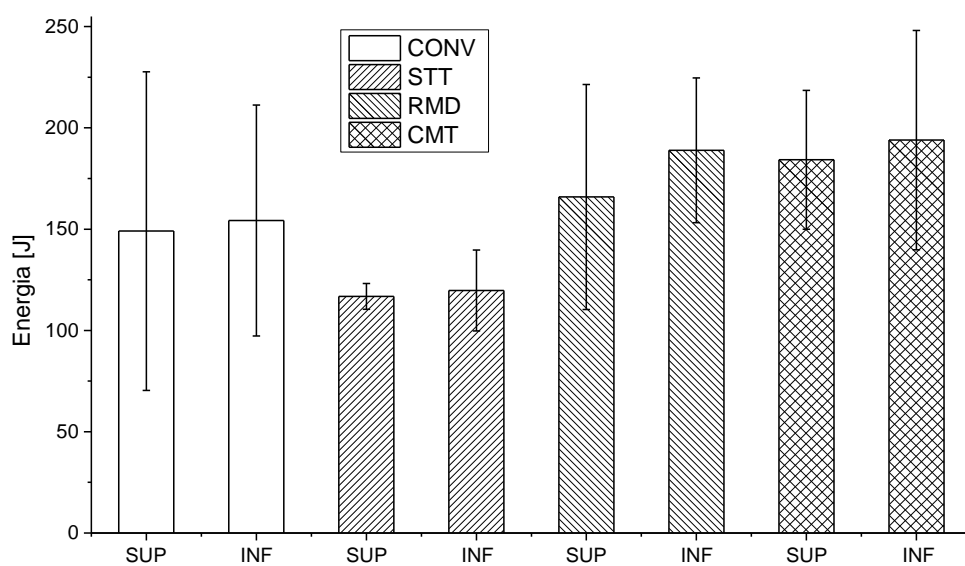


Figura 87. Energia absorvida em função do processo no quadrante superior (SUP) e inferior (INF)

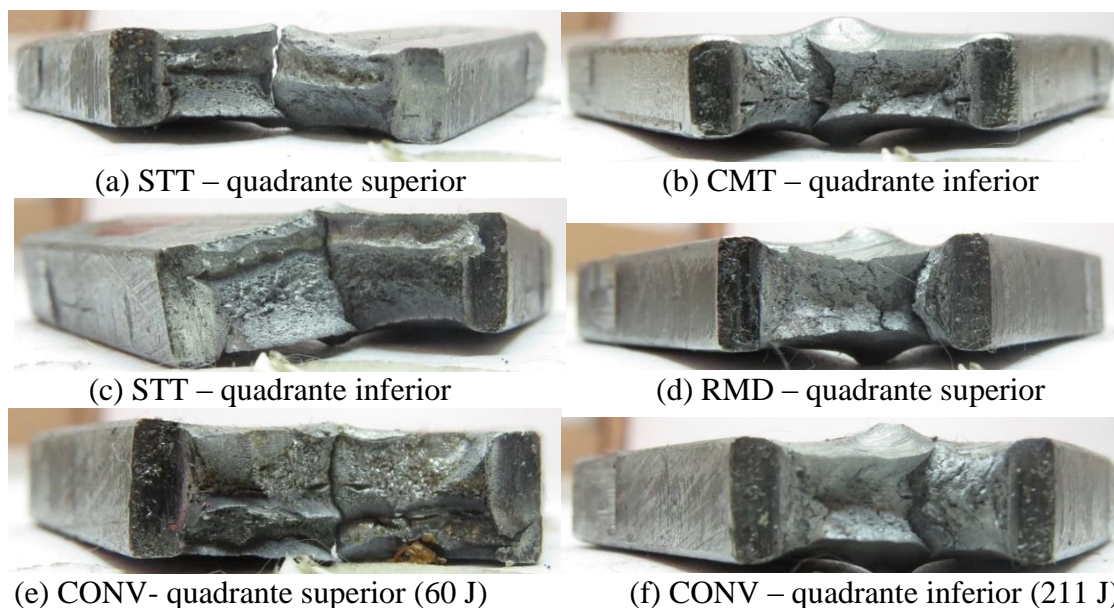


Figura 88. Detalhe das fraturas dos CP's do ensaio Charpy, com menor deformação (lado esquerdo) e maior deformação (lado direito): a e b: espessura 5,0 mm; c, d, e, f : espessura 6,4 mm

#### 6.4. Levantamento de parâmetros para passe de raiz para utilização no SVP

##### 6.4.1. Posição plana

Como visto no item anterior, o processo convencional e o STT não realizaram a junta com sucesso. Entretanto, como relatado, Nascimento (2015) ajustou melhor os parâmetros e conseguiu uma solda livre de defeitos para o processo STT. Já para o convencional, ele também não obteve sucesso. Diante disso, a partir da variação de parâmetros de soldagem em função da posição orbital da tocha espera-se obter não somente um conjunto de parâmetros adequados para o processo convencional. Espera-se também aumentar a faixa operacional desse processo. Não fosse por isto, não haveria necessidade de levantar parâmetros para a raiz, uma vez que para o passe de raiz, o processo convencional já obteve sucesso.

Como o parâmetro definido no Item 6.1 é capaz de realizar uma solda de raiz livre de defeitos (conforme norma API 1104) em uma junta tubular de meia cana, evidentemente este conjunto de parâmetros serve para soldagem na posição plana, vertical e sobrecabeça. Assim, este conjunto será o ponto de partida para o levantamento da maior velocidade de soldagem/alimentação possível para a posição plana.

O SSDR foi utilizado para a realização das soldagens nas três posições – plana/vertical/sobrecabeça. Primeiramente serão apresentados os resultados para a posição plana, depois para a vertical e por fim para a sobrecabeça.

Colocado o SSDR na posição plana, e com a fonte da Miller ajustada com o parâmetro de raiz Conv4 da Tabela 9, realizou-se um pequeno cordão de solda para somente verificar que tudo estava corretamente ajustado (Plana\_1\_raiz da Tabela 23). Como era de se esperar, o cordão visualmente apresentou penetração completa e bom aspecto geral.

Em seguida, aumentou-se a velocidade de alimentação para 6 m/min e a tensão para 21,5 V (Plana\_2\_raiz). Para se manter a mesma relação  $V_a/V_s$ , aumentou-se a velocidade de soldagem para 47 cm/min. Houve perfuração da raiz. Assim, no teste Plana\_3\_raiz, aumentou-se a tensão de 21,5 V para 24 V e também a velocidade de soldagem em 20% (de 47 cm/min para 56,5 cm/min) como forma de se evitar a perfuração da raiz. Continuou perfurando, e ainda observou-se a falta de material no meio do chanfro, como se tivesse somente soldado nas paredes do chanfro.

No teste seguinte (Plana\_4\_raiz), elevou-se a tensão para 26 V e somente aumentou-se a velocidade de soldagem em 10% (a partir dos 47 cm/min iniciais). A perfuração na raiz continuou. Aumentou-se ainda mais a tensão (27 V) e um pouco mais a velocidade de soldagem, e observou-se uma melhora (Plana\_5\_raiz). O arco de soldagem não perfurou a raiz, embora estivesse na iminência. Com isso, decidiu-se aumentar ainda mais a tensão e velocidade de alimentação (Plana\_6\_raiz). Finalmente a solda foi completada sem maiores problemas.

O próximo passo (teste Plana\_7\_raiz) foi verificar se com 7 m/min era possível realizar a soldagem. Manteve-se a mesma tensão e relação  $V_a/V_s$  da solda anterior, uma vez que se observou que o reforço de raiz do cordão anterior poderia ser aumentado. A soldagem também foi executada com sucesso. Seguindo o raciocínio, aumentou-se a velocidade de alimentação para 8 m/min e proporcionalmente a velocidade de soldagem (teste Plana\_8\_raiz). A soldagem também foi realizada com sucesso. Entretanto, percebeu-se uma pequena tendência de perfuramento da raiz em virtude do reforço excessivo.

Por este motivo, realizou-se o teste Plana\_9\_raiz em que a tensão foi elevada para 31 V. A soldagem se mostrou mais estável e visualmente sem defeitos. Infelizmente a velocidade de alimentação não pode ser mais aumentada, uma vez que para tal aumento, a velocidade de soldagem também deveria ser aumentada e o Tartilope estava no limite de sua velocidade. Ressalta-se que a velocidade ajustada no Tartilope é maior que a velocidade de soldagem, uma vez que este percorre uma distância maior já que caminha sobre a cinta que possui um diâmetro maior que o tubo soldado.

Dessa forma, o levantamento de parâmetros de soldagem para a posição plana terminou com o teste Plana\_9\_raiz. Salienta-se que neste teste, a corrente média e RMS ficaram em 306 A. Este teste limite para a posição plana está indicado em vermelho na Tabela 23 para melhor visualização. Por estes dados observa-se que o modo de transferência não é mais o curto-circuito, mas sim voo livre (Figura 89).

Tabela 23. Parâmetros regulados em chapa para soldagem na posição plana.

Teste*	Tensão [V]	Valim [m/min]	Vs [cm/min]	Valim/Vs
Plana_1_raiz	21	5	39,2	12,75
Plana_2_raiz	21,5	6	47,1	12,75
Plana_3_raiz	24	6	56,5	10,7
Plana_4_raiz	26	6	52	11,54
Plana_5_raiz	27	6	56,5	10,7
Plana_6_raiz	28,5	6	61,2	9,8
Plana_7_raiz	28,5	7	71,4	9,8
Plana_8_raiz	29	8	81,6	9,8
Plana_9_raiz	31	8	81,6	9,8

\* Em todos esses testes, manteve-se Freq. Tec. = 4,1 Hz, ampl. tec. = 3,0 mm, DBCP = 18 mm e indutância = 40%.

A velocidade de soldagem conseguida para a posição plana foi mais de 100% maior que a original (de 39,2 para 81,6 cm/min). Observa-se com isto que a priori, a posição plana é limitada por alguma outra posição (vertical ou sobrecabeça), quando solda-se com um único conjunto de parâmetros.

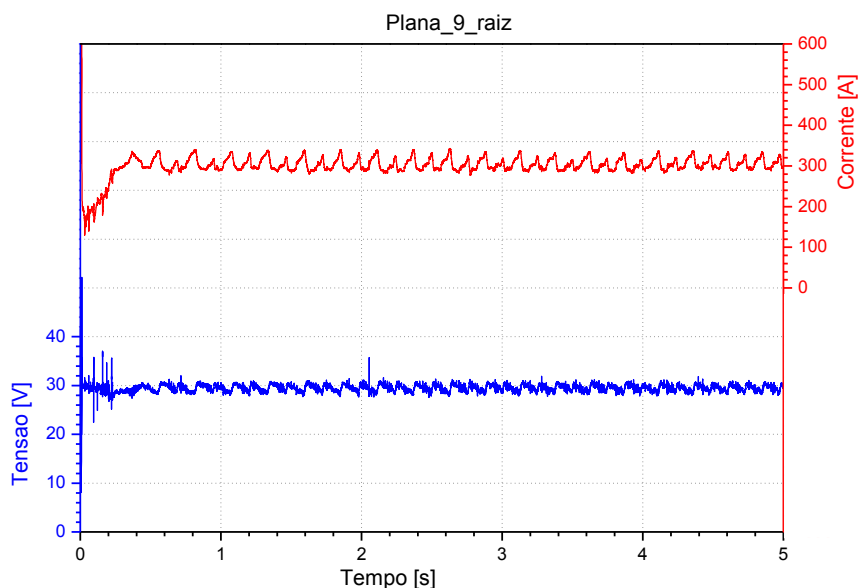


Figura 89. Oscilograma de tensão e corrente do teste Plana\_9\_raiz

#### 6.4.2. Posição vertical

Para o levantamento dos parâmetros de soldagem limites na posição vertical, alterou-se a posição do SSDR da plana para a vertical. O primeiro ensaio realizado (Vertical\_1\_raiz) repetiu os parâmetros Conv\_4 da Tabela 9 que são os mesmos da Plana\_1\_raiz da Tabela 23. Mais uma vez, repetido este teste agora para a posição vertical, novamente obteve-se sucesso.

No entanto, como a intenção é de aumentar a faixa operacional, a velocidade de alimentação do teste seguinte (Vertical\_2\_raiz) foi elevada para 6 m/min. A tensão de soldagem foi diminuída em relação ao teste anterior que tinha uma velocidade de alimentação até mesmo menor. Isto pode parecer conflitante, entretanto embora com 21 V o teste anterior tenha completado a solda com sucesso, esta tensão se mostra alta para a posição vertical dada a elevada tendência de escorrimento. Como forma de “segurar” melhor a poça, no teste Vertical\_2\_raiz (Tabela 24), apesar de se ter aumentado a velocidade de alimentação, diminuiu-se a tensão para 19 V. Este valor foi definido arbitrariamente e reflete a experiência adquirida do operador em perceber o quanto ainda se poderia diminuir a tensão de soldagem comparativamente ao teste Vertical\_1\_raiz.

Tabela 24. Parâmetros regulados em chapa para soldagem na posição vertical

Teste*	Tensão [V]	Valim [m/min]	Vs [cm/min]	Valim/Vs
Vertical_1_raiz	21	5	39,2	12,75
Vertical_2_raiz	19	6	47,1	12,75
Vertical_3_raiz	20	7	54,9	12,75
Vertical_4_raiz	20	8	62,7	12,75
Vertical_5_raiz	21	8	62,7	12,75
Vertical_6_raiz	21	9	70,6	12,75
Vertical_7_raiz	22	9	70,6	12,75
Vertical_8_raiz	24	9	70,6	12,75

No próximo teste (Vertical\_3\_raiz), aumentou-se a velocidade de alimentação para 7,0 m/min e a tensão para 20 V. O reforço de raiz permaneceu zerado, assim como nos testes anteriores e a solda foi completada com sucesso. No teste seguinte (Vertical\_4\_raiz), aumentou-se a velocidade de alimentação para 8 m/min mantendo-se a tensão em 20 V. O arco neste caso ficou muito pequeno e acabou por perfurar a raiz da solda. Elevou-se assim, no teste Vertical\_5\_raiz, a tensão para 21 V e a solda ficou excelente. Neste ponto, a corrente de soldagem já está no patamar de 266 A médio e 275 A RMS.

Nos testes seguintes do Vertical\_6\_raiz ao Vertical\_8\_raiz, buscou-se uma condição de soldagem para uma velocidade de alimentação de 9,0 m/min. No entanto, variou-se a tensão elevando-a e, mesmo assim, ocorria perfuração da raiz.

Com isso, a condição limite obtida para a soldagem do passe de raiz com o processo convencional soldando-se em chapa é o indicado na como Vertical\_5\_raiz. Na Tabela 24 estão indicados os testes que obtiveram um cordão visualmente adequado. O teste indicado em vermelho é o que será utilizado como parâmetro no SVP.

#### 6.4.3. Posição Sobrecabeça

Por fim, avaliou-se a condição paramétrica limite para a soldagem na posição sobrecabeça. Assim como para as posições anteriores, o primeiro teste da sobrecabeça foi a repetição dos parâmetros descritos na Tabela 9 (Conv\_4). Mais uma vez, este teste foi realizado com sucesso (Sobrecabeça\_1\_raiz – Tabela 25). Em seguida, aumentou-se

a velocidade de alimentação para 6 m/min. Houve muito desvio lateral do arco (*humping*). Como forma de se evitar este desvio, primeiramente aumentou-se a tensão de soldagem para 23 V (Sobrecabeça\_3\_raiz) e sem seguida diminuiu-se a velocidade de soldagem em aproximadamente 10% (Sobrecabeça\_4\_raiz). Ambos os testes não produziram cordões de solda visualmente adequados. No primeiro, o efeito do desvio lateral permaneceu e no segundo, houve muita concavidade na raiz e com isso, o cordão ficou mais elevado na junta resultando em falta de penetração.

Para reduzir o efeito do cordão ficar disposto alto em relação a junta soldada, diminuiu-se a tensão de soldagem (Sobrecabeça\_5\_raiz). Neste teste a solda aparentemente ficou boa. O reforço de raiz ficou zerado (sem concavidade). A face ficou um pouco projetada no meio, mas nada que impedisse o enchimento posteriormente. Apesar do resultado encontrado ter sido satisfatório, este não se mostrou robusto o suficiente dada a falta de repetitividade. Este conjunto de parâmetros às vezes dava certo, às vezes não, ocorrendo perfurações na raiz. Como não se busca somente um conjunto de parâmetros limite para cada condição, como também condições robustas, estes conjuntos de parâmetros foi descartado.

Prosseguiu-se então na busca pela melhoria destes parâmetros. Realizou-se um teste com 10% a mais de velocidade de soldagem (Sobrecabeça\_6\_raiz), e o que se observou foi um aumento ainda maior do *humping*. Este fato comprova o descrito por MENDEZ; NIECE e EAGAR (1999) em que o aumento da velocidade de soldagem resulta em aumento do efeito do desvio lateral do cordão. Por fim, mesmo os testes com 6,0 m/min não tendo obtido sucesso, realizou-se um último ensaio com 7,0 m/min (Sobrecabeça\_7\_raiz). Neste teste, o arco perfurava a raiz e o pouco do cordão que se formou ficou com a face bem convexa. Uma saída seria aumentar a tensão para evitar a perfuração da raiz, mas aumentaria a convexidade da face que é indesejável.

Tabela 25. Parâmetros regulados em chapa para soldagem na posição Sobrecabeça.

Teste	Tensão [V]	Valim [m/min]	Vs [cm/min]	Valim/Vs
Sobrecabeça_1_raiz	21	5,0	39,2	12,76
Sobrecabeça_2_raiz	21	6,0	47,0	12,77
Sobrecabeça_3_raiz	23	6,0	47,0	12,77
Sobrecabeça_4_raiz	23	6,0	43,0	13,95
Sobrecabeça_5_raiz	21,5	6,0	43,0	13,95
Sobrecabeça_6_raiz	21,5	6,0	51,8	11,58
Sobrecabeça_7_raiz	22	7,0	50,3	13,92

Diante dos resultados obtidos, pode-se concluir que a posição sobrecabeça foi a limitadora do conjunto de parâmetros para a soldagem circunferencial do passe de raiz, sendo o conjunto de parâmetros escolhido aquele do teste Sobrecabeça\_1\_raiz. Isso pois, tanto a posição plana como a vertical permitiram maiores valores de velocidade de alimentação/velocidade de soldagem. No entanto, na soldagem sem variação de parâmetros deve-se ter um único conjunto ajustado no início da soldagem. Estes parâmetros eram então limitados pela posição sobrecabeça.

### 6.5. Validação com o SVP dos parâmetros obtidos nas três posições de soldagem

No Item 6.4 apresentado anteriormente, foram realizados diferentes testes para levantar os parâmetros limites que permitam a soldagem pelo processo convencional na junta proposta (Figura 19) em a cada uma das três posições (plana/vertical/sobrecabeça). Seguindo os resultados das etapas apresentadas no fluxograma da metodologia (Figura 30) serão apresentados neste item os resultados da variação dos parâmetros limites encontrados nestas 3 posições em uma soldagem circunferencial utilizando-se do SVP.

Na Tabela 26 encontra-se um resumo dos parâmetros limites encontrados em cada posição. Chama-se a atenção ao fato de que tanto a posição plana como a vertical alcançaram valores de velocidade de alimentação/soldagem superiores ao utilizados para a soldagem com um único conjunto de parâmetros (Conv\_4 – Tabela 9).

Tabela 26. Resumo dos parâmetros obtidos em chapa para cada uma das três posições

Posição/Teste	Tensão [V]	Valim [m/min]	Vs [cm/min]	Valim/Vs
Plana_9_raiz	31	8,0	81,6	9,80
Vertical_5_raiz	21	8,0	62,7	12,76
Sobrecabeça_1_raiz	21	5,0	39,2	12,76

Embora se tenha definido parâmetros que soldem na posição 12h, 15h e 18h, não se sabia ao certo qual a faixa contemplada por cada posição, como já observado na literatura (Item 3.2). Por exemplo: a posição plana parte de 0° (12 h) e vai até quantos graus? Como os parâmetros levantados na Tabela 26 foram levantados a partir da soldagem em chapa, conseguiu-se exatamente cada uma das posições 12h, 15h e 18h. No entanto, o programa a ser inserido no SVP, precisa saber até qual ângulo vai a posição plana, onde começa/termina a transição para a vertical e assim por diante.



Assim, utilizou-se dos parâmetros da Tabela 26 para delimitar qual a faixa angular que cada parâmetro consegue realizar.

Para a posição plana, por exemplo, regulou-se a fonte de soldagem e o Tartílope para o parâmetro Plana\_9\_raiz. Iniciou-se a soldagem em 0° (12h) e somente interrompeu-se quando foi observado que o cordão formado não mais estava preenchendo corretamente a junta. Com o arco apagado, retornou-se o Tartílope manualmente até a posição em que o cordão visivelmente ainda estava adequado. Até 50° o parâmetro regulado para a plana, preenche a junta corretamente. Após este valor, a poça começa e escorrer e o cordão não atinge mais o nariz da junta, resultando em falta de penetração. Este ensaio não quer dizer que a posição plana vai até os 50°. Ele apenas confirma que o parâmetro levantado para a posição 0° consegue soldar a junta até 50°.

A mesma metodologia foi adotada para a posição vertical. Ajustou-se a fonte e o Tartílope para os parâmetros Vertical\_5\_raiz. O Tartílope foi colocado na posição 20° (julga-se que antes disso não seria possível soldar com esses parâmetros) e iniciou-se a soldagem. O arco foi perfurando a junta até aproximadamente 70° a partir de onde o cordão foi estabelecido se mantendo até aproximadamente 110° onde mais uma vez começou a perfurar a junta. Este teste para a posição vertical se mostrou mais difícil que o anterior para a posição plana. Isto pois ao se executar uma soldagem circunferencial de meia cana na descendente, a posição vertical é uma continuação da posição plana. Ou seja, a posição plana já iniciou e estabilizou a poça, promovendo inclusive um preaquecimento na junta. Iniciar uma soldagem com o parâmetro da posição vertical sem antes ter executado a plana, acaba por “forçar” o parâmetro. Apesar dessas dificuldades, esta abordagem foi utilizada por não se ver outra melhor.

Por fim, o conjunto de parâmetros limite da posição sobrecabeça é o mesmo que permite a soldagem circunferencial de meia cana sem variação de parâmetros. Sendo assim, como ele consegue realizar uma soldagem de 0 – 180°, não há necessidade de verificar a partir de que ponto esse parâmetro começa a valer para a sobrecabeça. A Figura 90 exemplifica a faixa angular que cada conjunto é capaz de executar.

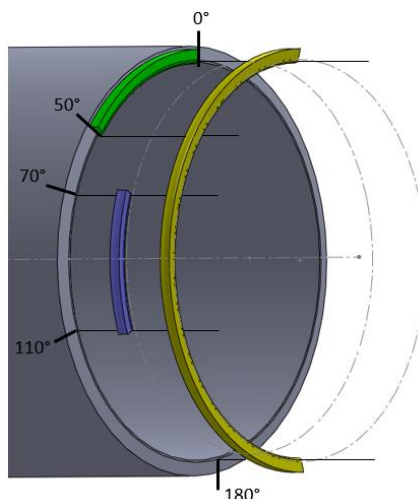


Figura 90. Faixa angular “soldável” para cada conjunto de parâmetros (verde – parâmetros da plana; azul – parâmetros da vertical; amarelo – parâmetros da sobrecabeça)

Diante do exposto, a transição da posição plana – vertical deve ocorrer entre pelo menos 50° e 70°. Já a transição da posição vertical – sobrecabeça deve ocorrer pelo menos entre 110° e 180°. Esses resultados diferem daqueles apresentados na literatura no Item 3.2.

Inicialmente, ajustaram-se os parâmetros da Tabela 26 no SVP, variando-se da plana para a vertical entre 50° - 70° e da vertical para a sobrecabeça entre 110° - 150° (SVP\_1\_raiz - Tabela 27). Logo que iniciada a primeira transição (plana para vertical – P-V), houve falta de penetração devido ao escorrimento. Logo em seguida (~65°) houve perfuração da raiz que se estendeu até por volta de 130°. Em seguida, a poça se estabilizou e o cordão foi formado até aproximadamente 170°. Dessa posição até 180° houve perfuração da raiz. É possível deduzir que o parâmetro da posição plana antes realizado em chapa e agora em tubo, se mostrou robusto não necessitando nenhum ajuste. O mesmo não ocorreu para a vertical, já que houve perfuração da raiz ao longo de toda a faixa. O parâmetro da sobrecabeça que, embora tenha sido o mesmo que conseguiu realizar a soldagem de 0° - 180°, acabou por perfurar a raiz no final da solda.

No que diz respeito às faixas de transição, verificou-se que como houve falta de penetração no início da primeira transição, ou seja, a influência do parâmetro da posição plana se estendeu demais. Uma vez que as faixas de transição contemplam uma transição linear entre o parâmetro da faixa anterior e da seguinte, quanto mais próximo, por exemplo, da posição plana maior a influência do parâmetro da plana. Quanto mais

próximo da vertical, maior a influência do parâmetro da vertical. Com isso, no início da primeira transição o parâmetro da posição plana é mais influente e acabou por determinar o escorrimento do cordão, uma vez que a tensão e a velocidade de soldagem ainda estavam elevadas para esta posição angular que já sofre maior influência da gravidade. Por outro lado, a perfuração ocorrida antes do final desta primeira transição, e que se prolongou até o meio da segunda transição, dá indícios de que o parâmetro da vertical não se adequou diretamente ao tubo. Ou seja, o parâmetro levantado em chapa para a posição vertical precisa de um ajuste para se adequar à soldagem em tubo. O fato da perfuração da raiz se estender até 130° mostra a influência do parâmetro da vertical na transição V-S (vertical-sobrecabeça). Somente com este parâmetro bem ajustado é que se poderá dizer se a faixa de transição V-S está adequada.

Tabela 27. Condições paramétricas para soldagem do passe de raiz com o SVP

teste	Parâmetros plana	transição P-V	Parâmetros vertical	transição V-S	Parâmetros sobrecabeça
SVP_1_raiz	U = 31 V    Valim = 8,0 m/min Vs = 81,6 cm/min	50° - 70°	U = 21 V	110° - 150°	U = 21 V
			Valim = 8,0 m/min		Valim = 5,0 m/min
			Vs = 62,7 cm/min		Vs = 39,2 cm/min
SVP_2_raiz		40° - 70°	U = 23 V	100° - 150°	U = 21,5 V    Valim = 5,0 m/min Vs = 39,2 cm/min
			Valim = 8,0 m/min		
			Vs = 62,7 cm/min		
SVP_3_raiz			U = 23,5 V    Valim = 7,0 m/min Vs = 62,7 cm/min	100° - 150°	
SVP_4_raiz				100° - 130°	
SVP_5_raiz				100° - 120°	

Para o segundo teste, manteve-se inalterado os parâmetros da posição plana uma vez que estes completaram a solda nesta posição com sucesso. Antecipou-se o início da transição P-V para 40°. Embora o parâmetro da plana complete bem a solda até 50°, a transição deve iniciar-se antes para que ao chegar em nesta posição angular, a influência dos parâmetros da posição plana seja menor. Para evitar-se a perfuração da raiz na vertical, elevou-se a tensão em 2V afim de se elevar o comprimento do arco. A transição V-S foi antecipada para 100°. Na sobrecabeça optou-se por aumentar em mais 0,5V a tensão de soldagem a fim de deixar o parâmetro mais robusto. Realizada a soldagem, observou-se uma instabilidade do arco durante a posição vertical. Ora ocorria

perfuração da raiz, ora a formação do cordão. A elevação da tensão melhorou o resultado (embora não o suficiente), entretanto a corrente ainda elevada está aquecendo muito e provocando a perfuração. Observou-se perfuração até por volta de  $110^\circ$ . Desse ponto em diante (até os  $180^\circ$ ), o cordão foi depositado com sucesso, ou seja, o aumento de 0,5 V para a posição sobrecaabeça tornou o parâmetro mais robusto. O reforço da raiz nesta posição ficou zerado (nivelado ao tubo), indicando que o aumento da tensão não implicou em falta de penetração.

Para o próximo teste (SVP\_3\_raiz), a tensão da vertical foi elevada em mais 0,5 V e a velocidade de alimentação diminuída de 1,0 m/min para a mesma velocidade de soldagem. Com isso, espera-se diminuir a energia imposta nesta posição pondo fim a perfuração da raiz. Os parâmetros da plana e sobrecaabeça se mantiveram os mesmos, assim como as faixas de transição. Realizada a soldagem, toda a solda ficou visualmente adequada até aproximadamente  $130^\circ$ . Com isso, conclui-se que o parâmetro utilizado para a vertical ficou adequado para a condição em tubo, uma vez que soldou toda a faixa da vertical ( $70^\circ$  à  $100^\circ$ ) sem maiores problemas. Uma perfuração ocorreu em  $130^\circ$  indicando que a energia nesta posição angular ainda está alta. Para o próximo teste reduziu-se a faixa da V-S de  $150^\circ$  para  $130^\circ$ . Espera-se com isto que neste último valor de ângulo, já se esteja soldando com os parâmetros da sobrecaabeça.

Realizado o teste SVP\_4\_raiz, aparentemente toda a solda ficou visualmente adequada. Entretanto, ao se repetir este mesmo teste mais uma vez (já que várias raízes foram necessárias para a realização do enchimento posteriormente), observou-se mais uma vez uma perfuração da raiz em torno de  $120^\circ$ . Com isso, realizou-se um último teste com a transição V-S terminando em  $120^\circ$ . Espera-se com isto diminuir a corrente de soldagem próximo a esta posição angular visto que a corrente da sobrecaabeça é menor que a da vertical.

Com isso, por fim o teste SVP\_5\_raiz completou a solda com sucesso sendo visualmente adequado para a realização do passe posterior de enchimento. Com este conjunto de parâmetros para as posições plana/vertical/sobrecaabeça juntamente com as faixas de transição selecionadas (evidenciado em vermelho na Tabela 27), foi possível realizar diversas raízes que serviram de base para os testes com os parâmetros finais de enchimento. Comprova-se com isto a repetitividade e robustez desse conjunto paramétrico de soldagem para o passe de raiz. Com isso, delimita-se os ângulos de transição de cada posição de soldagem, conforme Figura 91.

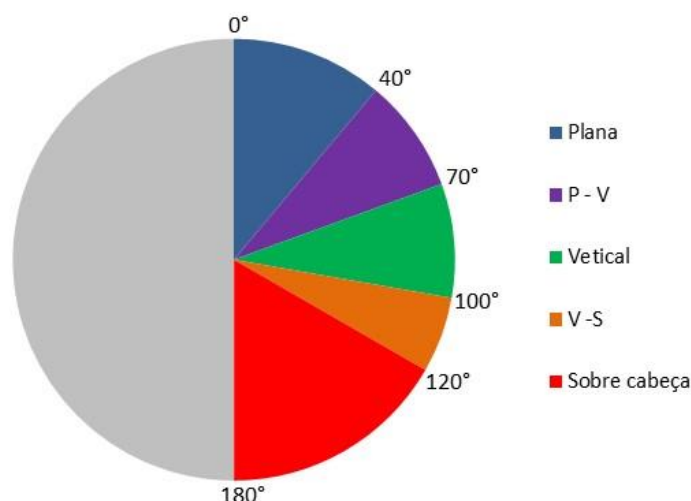


Figura 91. Ângulos de transição encontrados para o passe de raiz utilizando-se o SVP

Com os valores lidos de corrente e tensão de soldagem, é possível calcular a energia de soldagem, uma vez que esta é o produto da tensão pela corrente dividido pela velocidade de soldagem (MODENESI, 2014). Na Figura 92, observa-se os oscilogramas de corrente e tensão, a velocidade de soldagem ajustada e a de alimentação de arame lida, assim como a energia de soldagem instantânea e a energia média para cada posição de soldagem. Nesta Figura é possível observar o comportamento de todos os parâmetros de relevância para o processo de soldagem de raiz com o SVP. Nota-se o modo de transferência *spray* na posição plana e também a mudança de *spray* para curto-circuito na primeira faixa de transição (P-V). Ademais, observa-se nitidamente a variação de forma linear para a velocidade de soldagem/alimentação de arame nos intervalos referentes a transição de parâmetros. Observa-se também que com a variação de parâmetros de soldagem, consegue-se varrer a posição plana e vertical com praticamente a metade do tempo total de duração da soldagem.

Embora não seja um resultado obtido diretamente, a energia de soldagem foi calculada ponto a ponto (“instantânea”). Porém, como o modo de transferência predominante é o curto-circuito, o gráfico desta energia ao longo do processo fica difícil de se quantificar. Por este motivo, calculou-se a média da energia dentro de cada faixa angular. Em seguida, um gráfico também foi gerado para exemplificar esta média ao longo do tempo (Figura 92). Como se pode observar, o maior valor de energia imposta no processo foi alcançado na posição plana. Este resultado corrobora o fato de que a posição plana é mais fácil de se soldar e consequentemente é a que permite se utilizar mais energia.

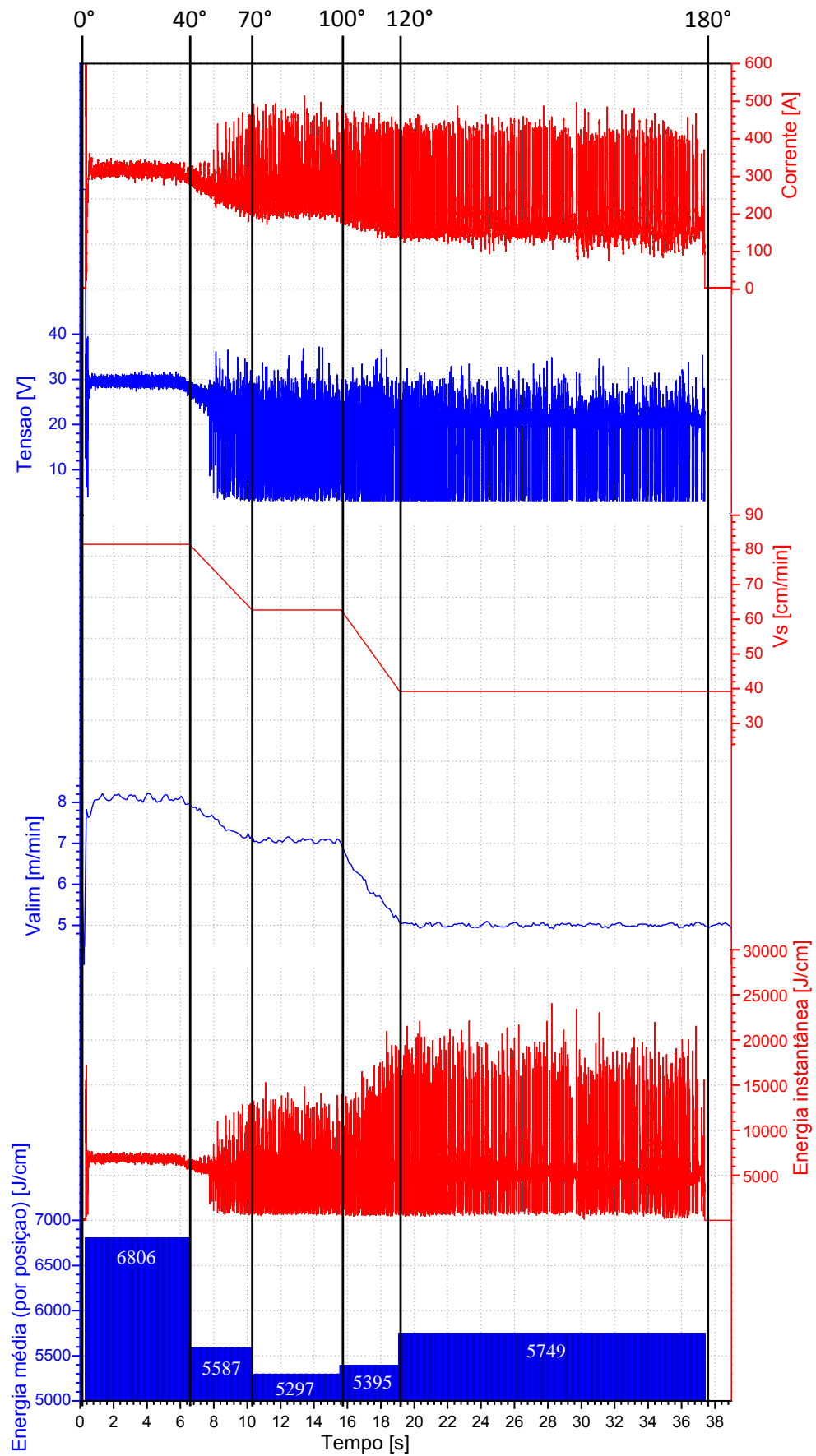


Figura 92. Gráficos do teste SVP\_5\_raiz

A posição vertical, por outro lado, foi a realizada com o menor valor de energia. As faixas de transição também obtiveram valores baixos de energia se comparadas às demais.

Embora a velocidade de soldagem não tenha sido aferida ao longo dos testes, seu valor pôde ser adquirido em função do valor de velocidade enviado ao driver do motor x do Tartílope. Ou seja, foi adquirido o valor com que se “mandou” o Tartílope se deslocar em função da posição angular. Este valor não foi medido. Contudo, sabendo-se a velocidade para cada faixa angular (plana/vertical/sobrecabeça), os intervalos angulares das faixas de transição e também que a transição se dá de forma linear, pode-se calcular o tempo necessário para cada faixa em função da distância a ser percorrida (meia cana do tubo).

Assim, como forma de exemplificar tal medição para o caso do teste SVP\_5\_raiz, a Tabela 28 indica o intervalo angular  $\Theta$  (em graus e em radianos), assim como a velocidade de soldagem linear  $V_s$  (no ponto de contato do arame com o tubo) e também a velocidade angular  $\omega_{sold}$ . Esta última é o resultado da velocidade linear dividido pela distância do centro do tubo ao nariz do chanfro<sup>7</sup>  $R_R$  como se pode ver na Equação (6):

$$\omega_{sold} = \frac{V_s}{R_R} \quad (6)$$

Tabela 28. Tabela de velocidade/tempo para cada posição angular

Posição	$\Theta$ [graus]	$\Theta$ [rad]	Vs [cm/min]	$\omega_{sold}$ [rad/min]	$\alpha_{sold}$ [rad/min <sup>2</sup> ]	tempo [s]
plana	0°	0	81,6	7,92	-	5,3
	40°	0,7				
Transição P-V	70°	1,22	-	-	-24,55	4,5
vertical	100°	1,75	62,7	6,09	-	5,2
	120°	2,09				
Transição V-S	180°	3,14	-	-	-32,33	4,2
sobrecabeça	120°	2,09	39,2	3,81	-	16,5
	180°	3,14				
					TOTAL	35,7

<sup>7</sup> Este valor de distância varia se for para o passe de raiz ou enchimento. Para a raiz, ele é medido entre o centro do tubo e o ponto imediatamente acima do nariz do chanfro, valendo  $R_R = 10,3$  cm. Já para o enchimento, esta distância é medida até a face da raiz e vale aproximadamente  $R_E = 10,7$  cm.

Como comentado no Capítulo 5, o Tartílope percorre entre as posições plana/vertical/sobrecabeça um movimento circular uniforme. Já as faixas de transição percorrem um movimento circular uniformemente variado. Assim, através dos valores de  $\Theta$ ,  $\omega_{sold}$  e da Equação de Torricelli (7) para movimento circular, pode-se calcular a aceleração angular ( $\alpha$ ) para as faixas plana-vertical e vertical-sobrecabeça.

$$\omega_{sold}^2 = \omega_{sold\_ini}^2 + 2 \cdot \alpha \cdot \Delta\theta \quad (7)$$

Por fim, observa-se na Tabela 28 o tempo necessário para percorrer as posições angulares com velocidade uniforme calculado através da Equação (8) (equação horária da posição angular no movimento circular uniforme) e, para as faixas com velocidade variada calculado através da Equação (9) (equação horária da velocidade angular).

$$\theta = \theta_{ini} + \omega \cdot t \quad (8)$$

$$\omega = \omega_0 + \alpha \cdot t \quad (9)$$

Observa-se que o tempo total teoricamente calculado para a percorrer o passe de raiz com o sistema SVP é de aproximadamente 36 segundos. Nota-se que este tempo se aproxima do tempo observado no oscilograma da Figura 92. Isto reforça o fato de que embora não tenha sido medida, a velocidade de deslocamento durante a soldagem se aproxima da velocidade desejada.

Como no teste convencional sem variação a velocidade de soldagem é a mesma da sobrecabeça com variação e, uma vez que esta gastou 16,5 s para percorrer 60°, para percorrer 180° demoraria aproximadamente 50 s. Este resultado demonstra que o tempo necessário para a soldagem com o SVP é 28% menor que o tempo gasto com o sistema convencional sem variação (Figura 93).

Contudo de nada adiantaria soldar-se mais rápido se a solda não ficasse adequada. Por este motivo foram realizadas macrografias das 5 posições de soldagem. Neste caso, o interesse é verificar a geometria (altura e largura dos reforços de solda e a concavidade/convexidade da face/raiz), a presença ou não de descontinuidades/defeitos de soldagem e a região de transição entre o metal de base e o metal de solda, chamada de ZTA (zona termicamente afetada) ou ZAC (zona afetada pelo calor).



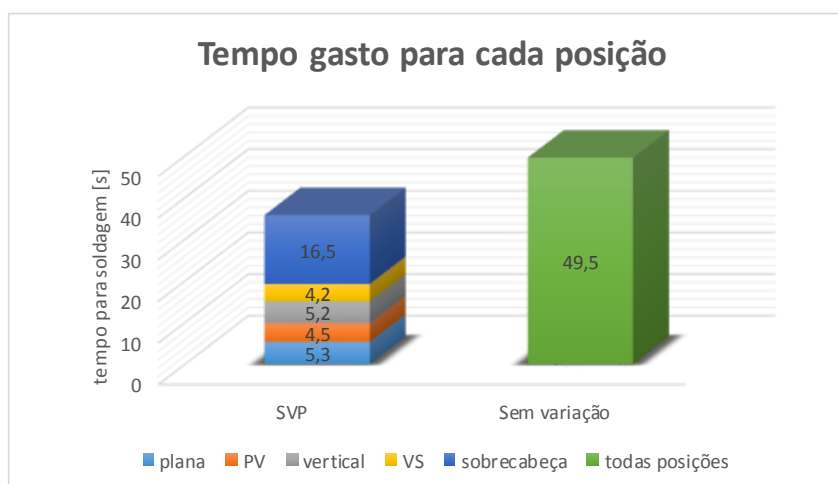


Figura 93. Gráfico comparativo entre o tempo gasto pelo SVP e pelo processo sem variação para soldagem do passe de raiz em tubo

Na Figura 94, estão apresentadas as macrografias realizadas para as 5 posições de soldagem. Em vermelho estão assinalados alguns poros que foram possíveis de se observar no material de base. Observa-se também as marcas de laminação advindas do processo de fabricação do tubo. Apesar destas descontinuidades no material, a solda em si não apresentou defeitos. Chama-se atenção aos reforços de raiz em todas as posições serem alinhados com o tubo (“zerados”). Inclusive na posição vertical embora tenha ocorrido um desalinhamento, o parâmetro utilizado foi robusto o suficiente para completar a solda sem falta de penetração. Na face, em todas as posições, o cordão apresentou boa concavidade, propiciando o enchimento no passe posterior.


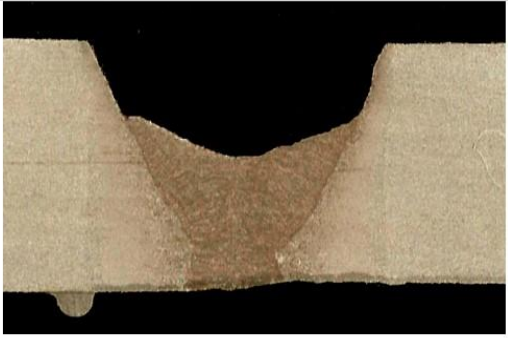
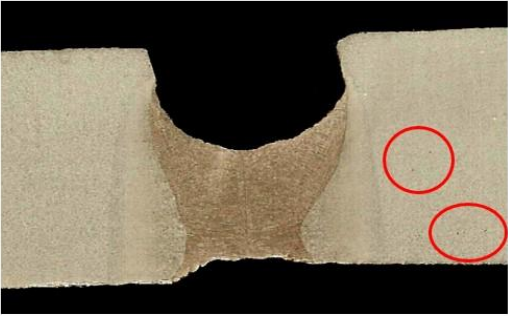


Posição	Macrografia
Plana	
Plana-Vertical	
Vertical	
Vertical-Sobrecabeça	
Sobrecabeça	

Figura 94. Macrografia do passe de raiz realizado com o SVP utilizando-se os parâmetros do teste SVP\_5\_raiz (considerar a espessura da chapa igual a 8,0 mm)

## 6.6. Levantamento de parâmetros para o passe de enchimento

Como já comentado no Item 6.2, uma das grandes dificuldades na realização dos testes para o levantamento de parâmetros para o passe de enchimento (sem variação de parâmetros) consistia na necessidade de realização de uma raiz para em seguida realizar o enchimento. Isto resultou na necessidade de realização de uma grande quantidade de juntas com uma raiz para realização do enchimento.

Diante desta dificuldade, foi idealizada uma forma de levantar preliminarmente os parâmetros de enchimento sem que fosse necessária uma junta com uma raiz já soldada. Para isto, utilizou-se como base um pedaço do tubo que após retirado o revestimento foi usinado com uma ferramenta especialmente construída de forma a “simular” uma junta com um passe de raiz já realizado. Ou seja, na usinagem, o material retirado seria referente ao passe de enchimento (sem o reforço). Este tubo teste foi ilustrado na Figura 23 do Item 4.1.

Na Figura 95, observa-se que as medidas do chanfro após a soldagem do passe de raiz se modificam.

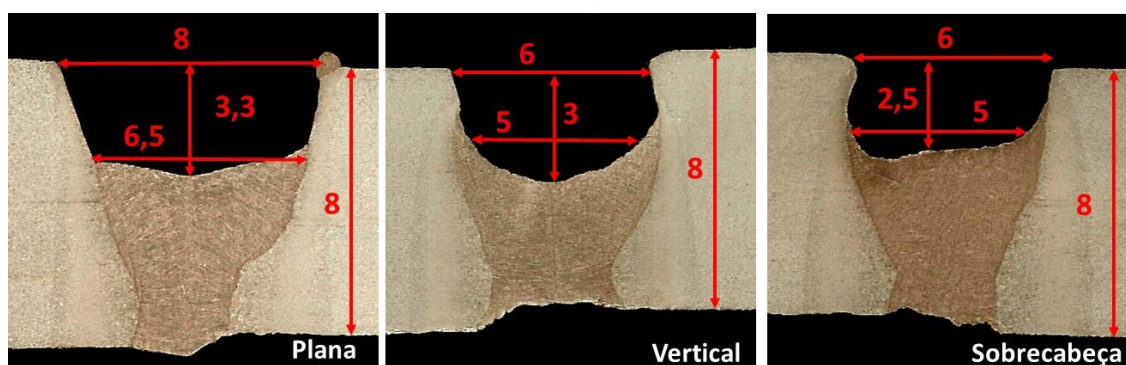


Figura 95. Medidas para cálculo do volume do enchimento com base na raiz realizada pelo SVP utilizando-se os parâmetros do teste SVP\_5\_raiz

Nota-se em especial que a abertura na posição plana (8 mm) é superior as medidas nas posições vertical e sobrecabeça (6 mm). Isto com certeza ocorreu devido ao modo de transferência voo livre utilizado como parâmetro para soldagem da posição plana. Como neste modo de transferência o arco é mais elevado, ele acabou por “escavar” um pouco as laterais do chanfro alterando as medidas originais. Outro ponto de destaque é que a distância  $h$  (distância medida entre a face da raiz e o ponto superior

do tubo) varia conforme se solda na plana, vertical e sobrecabeça. Na sobrecabeça, como a poça se solidifica após a passagem do arco e sobre ela age a força da gravidade, a tendência é que o cordão se solidifique mais próximo a face do tubo. Isto justifica inclusive o efeito de concavidade de raiz (reforço negativo) observado nas macrografias da Figura 79. Nesta Figura 79 nota-se que mesmo mantida a relação  $V_a/V_s$  (já que o parâmetro é único durante a soldagem), embora a área de seção transversal seja muito semelhante, ela se apresenta disposta mais abaixo no chanfro na posição plana (o que justifica o maior reforço de raiz), mais ao meio do chanfro na posição vertical (reforço de raiz praticamente zerado) e por fim mais acima do chanfro na posição sobrecabeça (reforço negativo). Este efeito foi minimizado nos ensaios com o SVP (Figura 94) já que como se pôde variar os parâmetros, a melhor relação  $V_a/V_s$  foi obtida para cada posição (9,8 – plana; 11,16 – vertical; 12,75 – sobrecabeça)<sup>8</sup>, minimizando este efeito.

Todavia as diferentes medidas do chanfro após a realização do passe de raiz, torna difícil a usinagem do tubo para simulação de uma raiz já pronta para levantamento de parâmetros do enchimento. Como estes “chanfros para enchimento” são produzidos no torno, torna-se difícil para não se dizer impossível variar a altura “h” bem como a abertura da junta conforme se vai usinando. No entanto, como o propósito é o levantamento de parâmetros, no tubo foi usinado um chanfro semelhante ao visualizado na Figura 96-a.

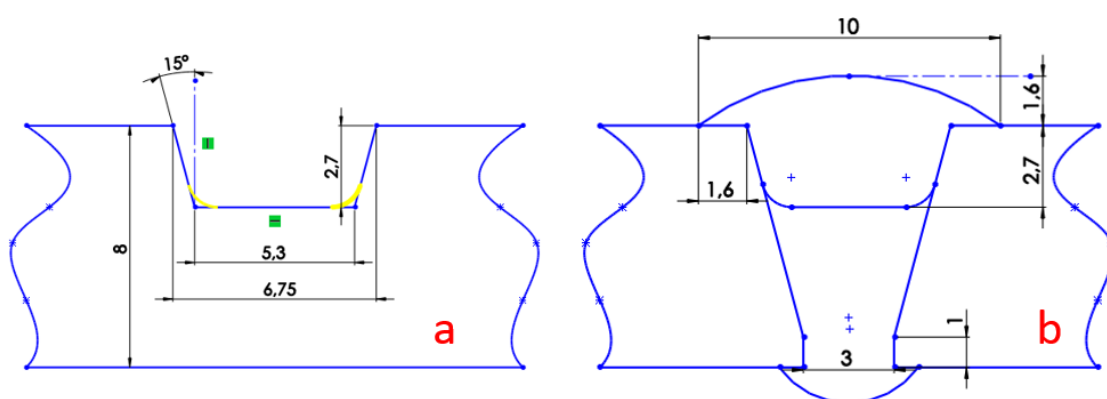


Figura 96. Detalhes do “chanfro simulado” (a) e do perfil do cordão de enchimento conforme API 1104 (b).

Embora as medidas da “raiz simulada” sejam as mesmas para todas as posições de soldagem, a área da seção transversal do cordão de enchimento irá variar de acordo

<sup>8</sup> Valores calculados a partir dos dados contidos na Tabela 27.

com a necessidade de cada posição conforme visto na Figura 95. Ou seja, após determinada qual a velocidade de alimentação desejada para a soldagem na posição plana, a velocidade de soldagem é calculada de forma que a seção transversal do cordão resultante seja equivalente a área necessária para encher o tubo nesta posição adicionado o reforço. O reforço do enchimento é determinado com base nas restrições da norma API 1104 e esboçado na Figura 96-b. É claro que como o chanfro simulado possui uma área de seção constante e como os volumes de material depositados em cada posição varia, a geometria final do cordão ficará diferente da desejada. Salienta-se que o interesse com o chanfro usinado é facilitar o levantamento de parâmetros de enchimento e não avaliar geometria do cordão. Isto será verificado posteriormente quando definido os parâmetros de enchimento e realizada a validação desses parâmetros sobre uma raiz previamente executada conforme a Figura 94.

Observa-se na Tabela 29 os testes realizados para levantamento dos parâmetros de enchimento com o SVP. Em todos os testes foi mantida a DBCP em 12 mm, a amplitude de tecimento (a.t.) igual a 4 mm além da inclinação da tocha em 15° puxando. Optou-se por estes valores em função dos melhores resultados observados na realização do enchimento sem variação de parâmetros. Como não se consegue variar a frequência de tecimento à medida que se varia a velocidade de soldagem, esta foi mantida em 4,1 Hz em todos os testes. Magalhães (2012) demonstrou que independentemente dos parâmetros do tecimento, este é essencial para obtenção de bons resultados.

O primeiro teste SVP\_1\_enchi foi realizado com a mesma velocidade de alimentação obtida por Nascimento (2015) no passe de enchimento com o processo STT, uma vez que este valor de velocidade de alimentação (4,4 m/min) foi maior que todos os conseguidos para o passe de enchimento até então no presente trabalho (ver Tabela 17). As faixas de transição inicialmente escolhidas foram as mesmas do passe de raiz. A tensão de soldagem para cada posição foi escolhida com base na observação e experiência adquirida durante o passe de enchimento sem a variação de parâmetros. Ou seja, na posição plana, a tensão deve ser mais elevada para aumentar a largura do cordão.

Tabela 29. Tabela de parâmetros dos testes de enchimento com o SVP

teste	Parâmetros	Plana	transição P-V	Vertical	transição V-S	Sobrecabeça
SVP_1_enchi	$U_{reg}$ [V]	23	40° - 70°	18	100° - 120°	22
	Valim [m/min]	4,4		4,4		4,4
	$V_s$ [cm/min]	22,4		28,8		45,2
	$V_a/V_s$	19,6		15,3		9,7
	$I_{média}$ lida [A]	190		176		174
SVP_2_enchi	$U_{reg}$ [V]	23	40° - 70°	21	100° - 120°	20
	Valim [m/min]	5,0		5,0		5,0
	$V_s$ [cm/min]	20,6		25		34,7
	$V_a/V_s$	24,3		20,0		14,4
	$I_{média}$ lida [A]	205		208		188
SVP_3_enchi	$U_{reg}$ [V]	23	40° - 70°	21	100° - 120°	21
	Valim [m/min]	6,0		6,0		6,0
	$V_s$ [cm/min]	24,7		30,0		41,6
	$V_a/V_s$	24,3		20,0		14,4
	$I_{média}$ lida [A]	229		232		207
SVP_4_enchi	$U_{reg}$ [V]	24	40° - 70°	22	100° - 120°	22
	Valim [m/min]	7,0		7,0		7,0
	$V_s$ [cm/min]	28,8		35		48,5
	$V_a/V_s$	24,3		20,0		14,4
	$I_{média}$ lida [A]	251		256		228
SVP_5_enchi	$U_{reg}$ [V]	24,5	40° - 70°	22,5	100° - 120°	23
	Valim [m/min]	8,0		8,0		8,0
	$V_s$ [cm/min]	32,9		40		55,5
	$V_a/V_s$	24,3		20,0		14,4
	$I_{média}$ lida [A]	273		276		248
SVP_6_enchi	$U_{reg}$ [V]	24,5	40° - 70°	22,5	100° - 120°	23,5
	Valim [m/min]	9,0		9,0		9,0
	$V_s$ [cm/min]	37		45		62,7
	$V_a/V_s$	24,3		20,0		14,4
	$I_{média}$ lida [A]	291		293		270
SVP_7_enchi	$U_{reg}$ [V]	24,5	40° - 70°	21	140° - 160°	23,5
	Valim [m/min]	9,0		6,0		9,0
	$V_s$ [cm/min]	37		30		62,7
	$V_a/V_s$	24,3		20,0		14,4
	$I_{média}$ lida [A]	291		228		272
SVP_8_enchi	$U_{reg}$ [V]	25	40° - 70°	21	140° - 160°	23,5
	Valim [m/min]	10,0		6,0		9,0
	$V_s$ [cm/min]	41		30		62,7
	$V_a/V_s$	24,4		20,0		14,4
	$I_{média}$ lida [A]	321		228		272

Na vertical, como o arco deve ficar mais concentrado para evitar que a poça escorra, a tensão deve ser menor. Por fim, na sobrecabeça, a tensão deve ser tal que

proporcione um arco curto o suficiente para segurar a poça, mas não tão curto a ponto de produzir um cordão muito côncavo (estreito). Notoriamente esses valores de tensão irão variar também em função da velocidade de alimentação.

Após realização deste primeiro teste, dois pontos merecem destaque. O primeiro é que o reforço da face ficou muito pequeno. Isto se deu ao fato de neste teste não ter sido acrescido a área referente ao reforço do cordão mas somente a área suficiente para encher o tubo. Apesar disso, o cordão foi depositado sem maiores dificuldades em todas as posições. O segundo ponto de destaque, é que as médias de corrente ficaram relativamente baixas. Nascimento (2015) reforça que para se evitar a falta de fusão observada nos passes de enchimento para este chanfro, a corrente média deve ficar acima de 190 A.

Por isso, para o segundo teste (SVP\_2\_enchi) a velocidade de alimentação foi aumentada para 5 m/min. Neste teste também foi adicionada a área referente ao reforço. O cordão resultante desta solda ficou muito bom, embora a largura final do cordão tenha ficado acima de 10 mm na plana e vertical. Os reforços da face melhoraram em relação ao teste anterior. Na vertical observou-se o efeito de achatamento do cordão. As correntes médias ficaram aproximadamente acima de 190 A o que pode ter evitado a falta de fusão observada no teste sem variação de parâmetros. Entretanto, notou-se que os parâmetros em geral ainda têm muita margem para aumentar a velocidade de soldagem.

No teste SVP\_3\_enchi, embora se tenha elevado a velocidade de alimentação em 1,0 m/min, não se elevou a tensão na plana e vertical de forma a tentar diminuir um pouco a largura do cordão. Visualmente o cordão também ficou muito bom. Na plana e na vertical observou-se um curto-circuito forçado em função da tensão não ter sido elevada. Na sobrecabeça o cordão ficou um pouco projetado no meio (côncavo). A corrente passou dos 200 A em todas posições.

No teste seguinte (SVP\_4\_enchi), elevou-se a velocidade de alimentação em todas as posições para 7,0 m/min e também elevou-se a tensão em 1,0 V para todas as posições. Na posição sobrecabeça o cordão ficou mais projetado no meio, o que pode levar a formação de mordeduras (embora não tenham sido observadas). Já na vertical, o cordão espalhou muito aumentando sua largura, embora o centro do cordão tenha ficado mais fundo em relação ao restante (reforço de face negativo).

Para o próximo teste (SVP\_5\_enchi), a velocidade de alimentação foi acrescida de 1,0 m/min enquanto que a tensão somente foi elevada em 0,5 V na vertical como forma de diminuir o comprimento do arco minimizando os efeitos encontrados no teste anterior. O cordão no geral ficou bom, embora ainda se tenha notado o reforço negativo na posição vertical. O efeito na sobrecabeça se manteve.

No SVP\_6\_enchi, a velocidade de alimentação foi elevada para 9 m/min em todas as posições. Na posição plana ficou muito bom. Na vertical, ocorreu falta de enchimento. De 100° até 150° observou-se este reforço negativo, ou seja, na primeira parte da sobrecabeça. De 150° aos 180° o reforço de face da sobrecabeça ficou levemente positivo sendo visualmente adequado (segunda parte da sobrecabeça). Poder-se-ia inicialmente pensar que estava faltando material na sobrecabeça, pois a área de enchimento real na sobrecabeça (Figura 95) é inclusive menor que a do chanfro simulado. Como na primeira parte do chanfro simulado o reforço é negativo, passa a impressão que falta material. No entanto, no final da sobrecabeça o reforço fica adequado, deixando claro que não é falta de material o problema. O que ocorre na primeira parte da sobrecabeça (100°-150°) é o espalhamento do cordão para além das laterais do chanfro. Com isso, falta material no meio do cordão (Figura 97-a).

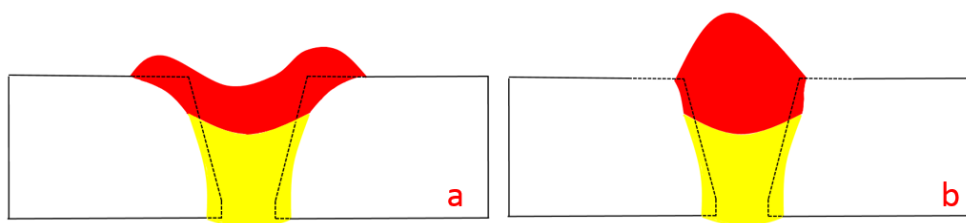


Figura 97. Efeito da concavidade da face do cordão de enchimento

Neste ponto surgem algumas alternativas:

1. Diminuir ainda mais a tensão na sobrecabeça para ver se o cordão espalha menos e aumenta o reforço de face, sob pena de no final da sobrecabeça (150° - 180°) aumentar muito o reforço da face (Figura 97-b).
2. Criar duas faixas para a sobrecabeça: uma entre 100° - 150° e a outra entre 150° e 180°. A faixa de intervalo entre estas duas faixas deveria ainda ser explorada.
3. Alterar a faixa de transição vertical-sobrecabeça, de forma que os parâmetros da sobrecabeça efetivamente comecem a atuar depois dos 150°. Com a



alteração da faixa, a velocidade de soldagem para sobrecabeça pode ser maior de forma a diminuir o reforço excessivo observado depois dos 150°.

4. Se alterar a faixa da sobrecabeça para além dos 150°, reduzir os parâmetros da vertical para o teste SVP\_3\_enchi. A partir dele a posição vertical de todos os testes ficaram sempre com um reforço negativo como o observado na Figura 97-a.

Dentre as soluções apresentadas, a primeira causaria um reforço de face muito grande no final da sobrecabeça, e por isso foi descartado. A segunda até mesmo poderia ser implementada, mas como teria de fazer alterações nos programas em C inseridos nos microcontroladores o que resultariam em aumento nos seus tamanhos, foi descartada. A memória dos microcontroladores já estava no limite, e alterações que provoquem aumento no tamanho do arquivo implicariam em substituição dos microcontroladores por outros de maior capacidade, e por isso foi decidido não utilizar esta abordagem neste trabalho. Esta opção de uma outra faixa para a sobrecabeça será objeto de sugestão para trabalhos futuros.

Alterar a faixa operacional da posição sobrecabeça no passe de enchimento para depois de 150° parece ser a solução mais viável. Entretanto, ela implica na necessidade de ampliação da faixa operacional da vertical. Embora côncavos, alguns passes de enchimento na vertical poderiam até ser aceitos conforme a API 1104, uma vez que o ponto mais baixo da concavidade ainda estaria acima da superfície externa do tubo. Entretanto optou-se pela robustez do envelope operacional, descartando estes parâmetros que provoquem essa concavidade. Com isso, por se observar que a partir do teste SVP\_3\_enchi, a face de todos os passes de enchimentos ficou côncava na vertical assim como observado na Figura 97-a, nos testes seguintes utilizou-se os parâmetros do teste SVP\_3\_enchi como ponto de partida para a soldagem da vertical.

Dessa forma, no teste SVP\_7\_enchi, utilizou-se os parâmetros da posição plana e sobrecabeça do teste SVP\_6\_enchi e o parâmetro da vertical do teste SVP\_3\_enchi. Apenas a faixa de transição da vertical-sobrecabeça foi alterada para 140° à 160°. Como o problema de concavidade ocorria até aproximadamente 150°, espera-se resolver o problema. Visualmente, obteve-se sucesso e o efeito de concavidade da face observado nos testes anteriores foi sanado. A transição para a sobrecabeça transcorreu sem maiores

dificuldades e aparentemente o parâmetro para soldagem no chanfro simulado está definido.

Por fim, como a posição plana não apresentou problemas neste último teste (SVP\_8\_enchi), a velocidade de alimentação nesta posição foi aumentada para 10 m/min objetivando-se alcançar o limite operacional. Infelizmente, houve perfuração da raiz nesta posição, evidenciando o alto valor de corrente (~321 A). Conclui-se que posição plana já está no limite. As demais posições repetiram os resultados do teste anterior, uma vez que os parâmetros são os mesmos.

Na posição sobrecabeça, como o valor de corrente alcançado no teste SVP\_7\_enchi já está elevado (~272 A), nem mesmo se tentou aumentar a faixa operacional, uma vez que como na plana não se conseguiu, assumindo-se que a sobrecabeça é uma posição mais crítica, esta também não conseguiria. Reforça-se que o objetivo é levantar parâmetros robustos (com repetitividade) e que estejam no limite operacional de cada posição. Nesse ponto, delimita-se os ângulos de transição de cada posição de soldagem, conforme Figura 98.

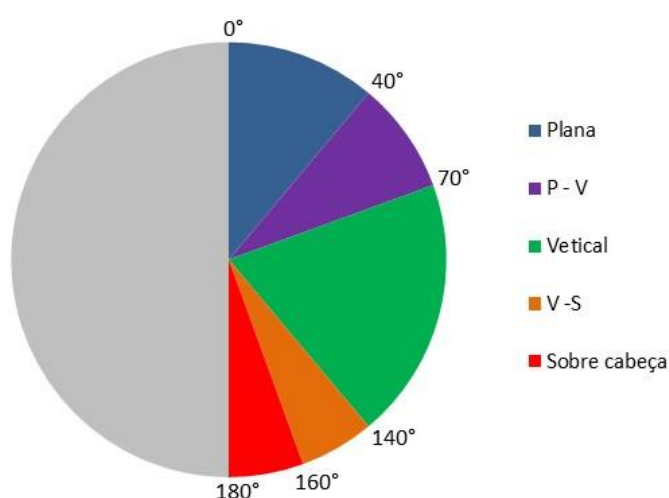


Figura 98. Ângulos de transição encontrados para o passe de enchimento utilizando-se o SVP

Uma vez definido o correto ajuste do processo pela seleção dos parâmetros do teste SVP\_7\_enchi, partiu-se para sua execução sobre um passe de raiz propriamente dito e não no chanfro simulado. Esse novo teste executado em condições reais é denominado de SVP\_9\_enchi, cujos parâmetros são mostrados na Tabela 30. Destaca-se que o teste SVP\_9\_enchi foi executado sobre raiz soldada com os mesmos parâmetros do teste SVP\_5\_raiz. Realizada a raiz com base nos parâmetros do teste SVP\_5\_raiz,

observou-se que na posição plana o cordão ficou no limite da largura admissível e a posição vertical aparentemente sofreu com a falta de material, apresentando um reforço pequeno e convexo.

Para a execução do enchimento, os parâmetros do teste SVP\_9\_enchi se basearam nos parâmetros do teste SVP\_7\_enchi, mas agora com 0,5 V a menos na plana e 0,5 V a mais na sobrecabeça. Para contornar o problema de pouco material na sobrecabeça, reduziu-se a velocidade dessa posição de aproximadamente 15% em relação ao teste SVP\_7\_enchi. O resultado obtido ficou adequado visualmente. Considera-se que este seja o parâmetro final para a condição de enchimento com o SVP (Tabela 30).

Tabela 30. Condições paramétricas finais para soldagem do passe de enchimento com o SVP

teste	Parâmetros	Plana	transição P-V	Vertical	transição V-S	Sobrecabeça
SVP_9_enchi	$U_{reg}$ [V]	24	40° - 70°	20	140° - 160°	24
	$Valim$ [m/min]	9,0		6,0		9,0
	$Vs$ [cm/min]	37		30		53,5
	$Va/Vs$	24,3		20,0		16,8
	$I_{média}$ lida [A]	297		221		284

Assim como realizado para o passe de raiz com o SVP, no enchimento também se calculou a energia gasta no processo. Na Figura 99, observa-se os oscilogramas de corrente e tensão, a velocidade de soldagem ajustada e a de alimentação de arame lida, assim como a energia de soldagem instantânea e a energia média para cada posição de soldagem. Nesta figura é possível observar o comportamento de todos os parâmetros de relevância para o processo de soldagem de enchimento com o SVP. Nota-se os valores de energia de soldagem muito superiores aos do passe de raiz (Figura 92). Embora a velocidade de alimentação na posição vertical para o passe de raiz seja superior ao do enchimento (7,0 m/min contra 6,0 m/min), a velocidade de soldagem diminuiu de forma significativa (62,7 cm/min contra 30 cm/min). Com isso, notoriamente se aumenta a energia de soldagem. Estes maiores valores de energia observados no passe de enchimento colaboram para que não aja defeitos como falta de fusão observados no passe de enchimento sem variação de parâmetros.

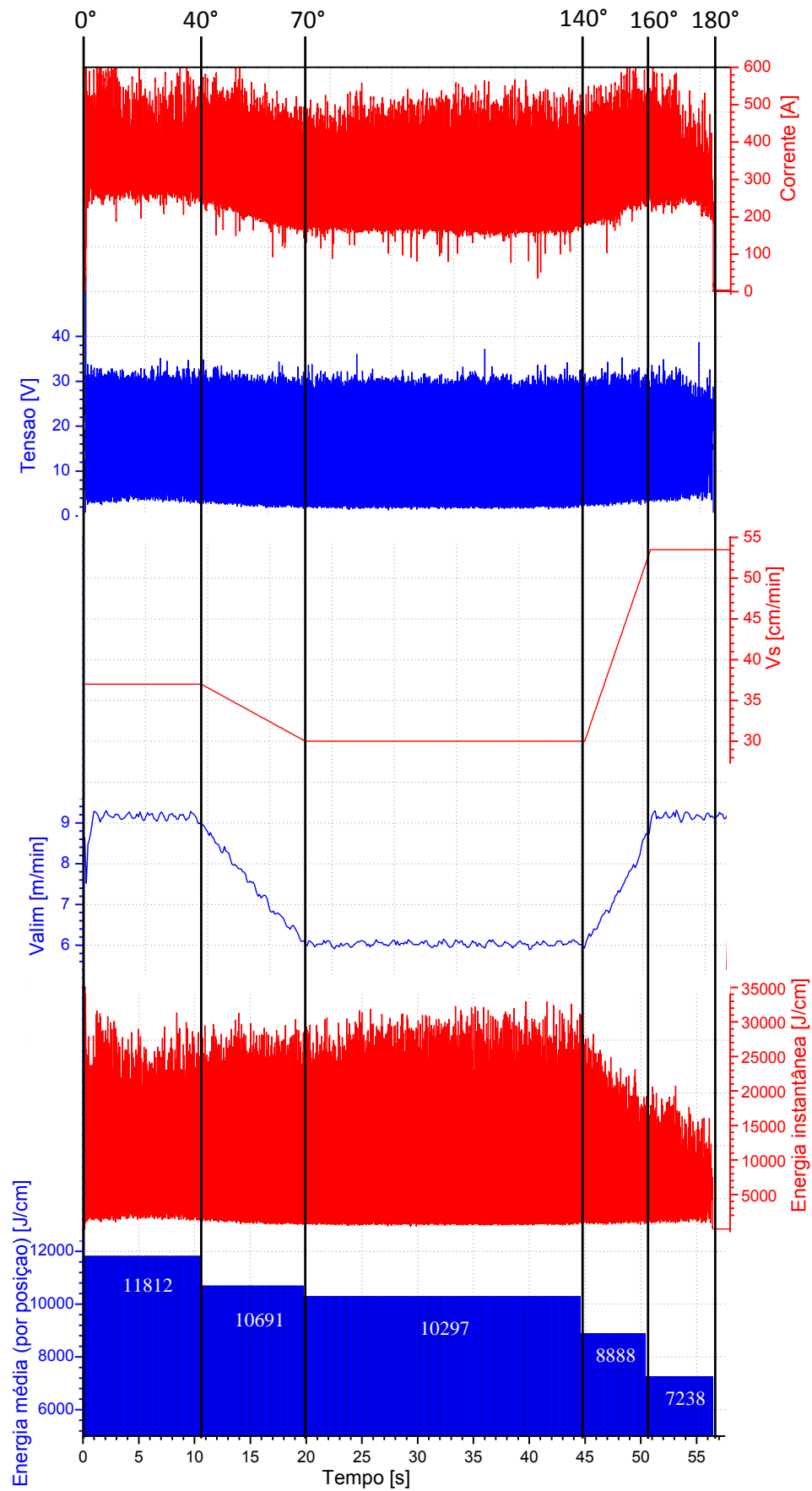


Figura 99. Gráficos do teste SVP\_8\_enchi

Pela Figura 99, também se observa que a posição que necessita de maior tempo para execução é a vertical, já que possui menor velocidade que as outras posições. A menor velocidade de soldagem se justifica pela menor velocidade de alimentação. Apesar dos menores valores de velocidade de soldagem/alimentação, não é a que possui menor valor de energia, ganhando da sobre cabeça.

Analisando os oscilogramas de tensão e corrente da Figura 99, nenhuma posição alcança o modo de transferência voo livre como alcançado pela posição plana no passe de raiz. Isto se deve principalmente à necessidade de se usar arcos curtos em função dos elevados valores de energia já alcançados pelos baixos valores de velocidade de soldagem, visando “encher” a junta. Caso contrário, um maior comprimento de arco, implicaria num nível ainda maior energia, vindo a perfurar a raiz. Na posição plana por exemplo, caso se utilizasse o modo de transferência voo livre com a velocidade de apenas 37 cm/min, o valor de energia seria muito elevado e o arco perfuraria a raiz. Isso é tanto verdade, que mesmo o teste SVP\_8\_enchi fazendo uso da transferência curto-circuito, houve perfuração da raiz. No passe de raiz (Figura 92), somente se conseguiu transferência em voo livre em função da elevada velocidade de soldagem (81 cm/min).

Por fim, na Figura 100 compara-se o tempo necessário para realização do passe de enchimento com e sem variação de parâmetros. Nota-se que enquanto o processo sem variação leva em torno de 93 segundos<sup>9</sup>, o com variação de parâmetros leva somente 58 segundos, o que representa um ganho de 38% no tempo gasto. Mas a vantagem não é somente no tempo gasto para soldar. No processo sem variação de parâmetros, observou-se falta de fusão. Já com a variação de parâmetros, não houve nenhum defeito conforme se pode observar no item seguinte (Item 6.7).

---

<sup>9</sup> Obtido através da divisão do comprimento de meia circunferência do tubo pela velocidade de soldagem (Tabela 13)

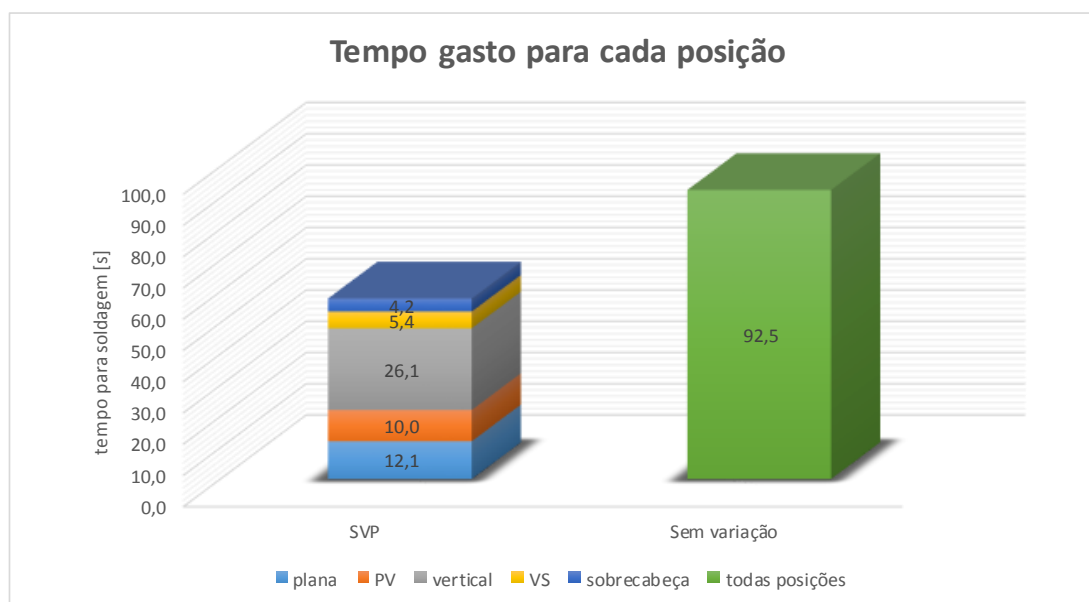


Figura 100. Gráfico comparativo entre o tempo gasto pelo SVP e pelo processo sem variação de parâmetros para a soldagem do passe de enchimento em tubo

Por fim, pode-se destacar que mesmo se comparando os resultados obtidos pelo SVP para o processo convencional com os resultados obtidos pelo processo RMD (sem variação de parâmetros) que foi o mais rápido, o processo convencional com variação de parâmetros consegue ser aproximadamente 30% mais rápido e sem defeitos.

### 6.7. Avaliação final do cordão de solda obtido com o SVP

Para a validação das soldas sem variação de parâmetros foram realizados todos os ensaios mecânicos (além da macrografia) previsto na API 1104 e os seus resultados podem ser vistos no Item 6.3. Pôde-se verificar que embora tenha apresentado falta de fusão, o cordão de enchimento realizado com o processo convencional somente foi reprovado no ensaio de dobramento de face.

É claro que, como comentado no Item 6.3, foi possível notar no ensaio Charpy por exemplo, que quando a solda apresentava falta de fusão, a energia absorvida embora acima do exigido apresentava-se inferior as demais soldas. Por isto se nota que os ensaios mecânicos por si só não são suficientes para desqualificar uma solda com falta de fusão, à exceção do ensaio de dobramento de face que foi o único capaz de mostrar o defeito de falta de fusão encontrado no enchimento. Provavelmente, se houvesse falta de fusão na raiz, o ensaio de dobramento da raiz encontraria o defeito. No entanto, é

plausível de se concluir que caso o cordão de solda não apresente falta de fusão em um ensaio macrográfico, ele facilmente passará no ensaio de dobramento de face. Deseja-se com este raciocínio demonstrar que o ensaio macrográfico caso apresente falta de fusão, descarta imediatamente o cordão, o que não aconteceria se fossem realizados os ensaios mecânicos.

Assim, para os cordões de solda produzidos com o SVP, somente se realizará ensaios macrográficos para verificação de possíveis discontinuidades. Uma vez que estas não sejam visualizadas, os cordões serão considerados adequados mesmo sem a realização dos ensaios mecânicos. Salienta-se que o objetivo não é qualificar a solda (caso em que deveriam ser realizados todos os ensaios), mas sim garantir a robustez dos parâmetros de soldagem levantados. Neste sentido, na Figura 101 está representada a macrografia obtida a partir de uma solda com os parâmetros SVP\_5\_raiz e SVP\_9\_enchi.

Como forma de assegurar a repetitividade e consequente robustez dos parâmetros, foram realizadas duas soldas com os mesmos parâmetros. A primeira foi apresentada na Figura 101. A segunda é apresentada na Figura 102. Nota-se a grande semelhança entre a Figura 101 e Figura 102, o que reforça que os parâmetros obtidos para a raiz (SVP\_5\_raiz) e enchimento (SVP\_9\_enchi) são realmente robustos e passíveis de repetição.

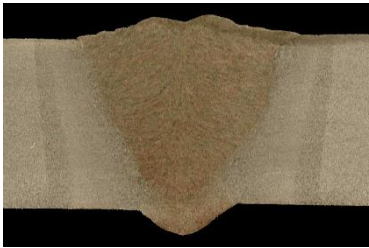






Posição	Macrografia	Foto da face	Foto da raiz
Plana			
Plana- Vertical			
Vertical			
Vertical- Sobrecabeça			
Sobrecabeça			

Figura 101. Macrografia da primeira solda realizada com o SVP utilizando-se os parâmetros SVP\_5\_raiz e SVP\_9\_enchi (considerar a espessura da chapa igual a 8,0 mm)





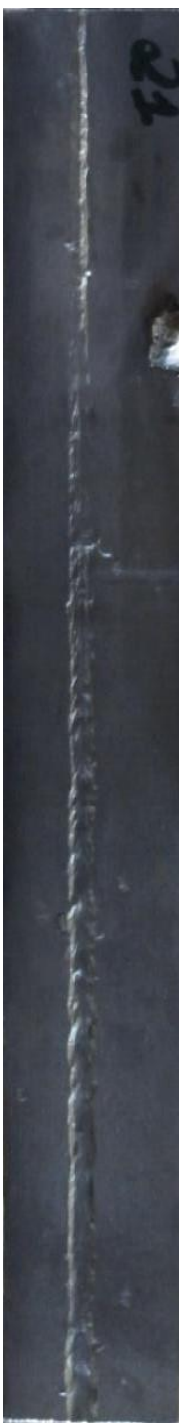



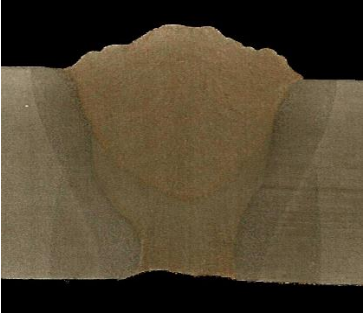
Posição	Macrografia	Foto da face	Foto da raiz
Plana			
Plana-Vertical			
Vertical			
Vertical-Sobrecabeça			
Sobrecabeça			

Figura 102. Macrografia da segunda solda realizada com o SVP utilizando-se os parâmetros SVP\_5\_raiz e SVP\_9\_enchi (considerar a espessura da chapa igual a 8,0 mm)

Na posição vertical de ambas as soldas, verifica-se o efeito do achatamento do cordão já comentado no Item 6.6. Além do mais, observa-se que nesta posição o cordão não obteve o efeito observado na Figura 97-a, uma vez que optou-se por utilizar apenas

6,0 m/min de velocidade de alimentação de forma a justamente se garantir que este efeito não fosse observado.

Na foto da face das Figuras 102 e 103, nota-se que na posição vertical a largura do cordão supera inclusive a da posição plana, evidenciando o efeito do escorrimento característico desta posição (mas que não foi suficiente para gerar defeito). Por outro lado, na sobrecabeça, verifica-se o cordão com um reforço de face maior e mais côncavo, embora plenamente dentro dos limites normativos (API 1104).

Diferentemente do observado no teste SVP\_9\_enchi, no teste SVP\_6\_enchi (Figura 103) houve o efeito de convexidade da face em virtude do escorrimento. Embora a principal alteração em parâmetros para o teste SVP\_9\_enchi em relação ao SVP\_6\_enchi sejam os parâmetros da vertical, como a faixa de transição ainda estava de 100° à 120°, tanto a esta posição (vertical) como a transição vertical-sobrecabeça tiveram este efeito. Isso se deve, como já dito, em função da elevada velocidade de alimentação/soldagem para estas posições o que acaba por tornar a poça muito quente e consequentemente fluida favorecendo o escorrimento. Reforça-se que o teste SVP\_6\_enchi (Tabela 29) possui os mesmos parâmetros do teste SVP\_9\_enchi (Tabela 30) para as posições plana e sobrecabeça. Por este motivo se nota que nestas posições os ensaios macrográficos não apresentaram problemas.

Ainda em relação a Figura 103, evidencia-se que o escorrimento nas posições vertical e vertical-sobrecabeça resultou em falta de fusão no cordão de enchimento. Pela avaliação da foto da face, percebe-se que a largura do cordão nestas posições ficou excessiva e muito acima do estabelecido na norma API 1104 (2010).

Finalmente, ressalta-se que as fotos de face/raiz observadas na Figura 101, Figura 102 e Figura 103 foram planificadas conforme técnica apresentada por Nascimento (2015). Embora as imagens sejam originalmente de uma superfície curva (tubo), elas foram planificadas. A partir de filmagem ao longo do cordão no tubo, são geradas pequenas imagens dessa filmagem que após serem unidas lado a lado, compõe a imagem final planificada. Toda a técnica utilizada para a geração dessas imagens está descrita no trabalho de Nascimento (2015).








Posição	Macrografia	Foto da face	Foto da raiz
Plana			
Plana-Vertical			
Vertical			
Vertical-Sobrecabeça			
Sobrecabeça			

Figura 103. Macrografia da segunda solda realizada com o SVP utilizando-se os parâmetros SVP\_5\_raiz e SVP\_6\_enchi (considerar a espessura da chapa igual a 8,0 mm)

## 7. CONCLUSÃO

Em função do escopo e objetivos propostos do trabalho delimitados pela experimentação executada, é possível traçar as seguintes considerações finais:

➤ Com relação aos resultados:

Os primeiros ensaios realizados neste trabalho foram para a validação do SSDR (Simulador da Soldagem de Dutos por Retificação). Os testes foram iniciados a partir dos parâmetros centrais do envelope levantado em trabalhos anteriores por Magalhães (2012). Alguns ajustes em relação aos parâmetros iniciais foram necessários para adequar os parâmetros ora levantados em chapa e, agora validados em tubo. Tanto o processo GMAW convencional como seus derivativos (STT, RMD e CMT) obtiveram resultados positivos para o passe de raiz. É interessante observar que somente no processo convencional a DBCP foi maior (18 mm) enquanto que nos processos controlados ela foi menor (15 mm). Associa-se este fato a falta de controle do processo convencional o que resulta em perfuração da raiz quando se utiliza uma DBCP menor.

Embora se esperasse que o passe de raiz fosse o mais problemático, este apresentou maior facilidade de execução que o de enchimento. Enquanto na raiz o maior desafio era evitar a perfuração da solda, no enchimento o desafio consistia em evitar o escorrimento e consequente falta de fusão. Na raiz o efeito do escorrimento é menos pronunciado devido a poça ir sendo “segurada” pelas paredes da junta que por estarem mais frias, roubam calor da poça facilitando a solidificação com mínimo escorrimento. Já no enchimento, além da poça de soldagem ser maior (necessária para o correto preenchimento da junta), resta uma parte menor de “parede” da junta para frear a poça.

Apesar destas dificuldades, foram obtidos parâmetros de enchimento que completaram a solda com todos os processos avaliados. Após a realização de ensaios mecânicos/macrográficos para a verificação da integridade das juntas soldadas, constatou-se que tanto o processo RMD como o CMT, apresentaram soldas de qualidade, sendo consideradas adequadas por todos os ensaios realizados. Entretanto, as soldas efetuadas com o processo convencional e com o STT não se mostraram adequadas, uma vez que devido à falta de fusão, foram reprovadas no ensaio macrográfico e de dobramento de face. Apesar disso, Nascimento (2015) realizou testes com a mesma junta e obteve resultados positivos para a tecnologia STT. Embora

também tenha sido realizado um esforço para obtenção de uma condição adequada com o processo convencional, este processo se mostrou incapaz de completar uma solda de enchimento para a junta avaliada.

Para solucionar esse problema de falta de fusão no processo convencional, foi desenvolvido um protótipo de equipamento (SVP) que controla a variação de parâmetros de soldagem ao longo do deslocamento ao redor do tubo. Este equipamento que faz a variação simultânea da tensão e das velocidades de soldagem e de alimentação de arame em função da posição angular ao redor do tubo, permite que para cada posição ao redor do tubo se utilize a condição paramétrica mais adequada.

Após o levantamento dos parâmetros mais adequados para a soldagem desta junta em cada uma das três posições (plana, vertical e sobrecabeça) foram realizadas soldas para o passe de raiz e enchimento.

Ainda que o passe de raiz já tenha obtido resultados satisfatórios com o processo convencional sem variação de parâmetros, a utilização do sistema SVP para realização do passe de raiz permitiu um ganho de 28% em termos de tempo.

Já a realização de soldas para o passe de enchimento com a utilização do SVP, permitiu que o processo convencional que sem variação não conseguia soldas adequadas, agora com a variação de parâmetros conseguiu. Os ganhos com a variação vão além capacidade do processo convencional realizar o passe de enchimento com sucesso, visto que uma solda que antes levava 92 s para sua realização agora leva 58 s (um ganho de 38%). Entretanto comparar o tempo gasto de uma solda adequada com outra que deu falta de fusão pode não ser a melhor comparação. Entretanto, mesmo se comparado o resultado obtido para o enchimento com o SVP ao processo RMD (com parâmetros constantes, mas com solda adequada), o SVP continua levando uma vantagem de mais de 30% em termos de tempo. Esses resultados passam a ser mais expressivo quando se solda um grande volume de juntas na formação de um oleoduto, por exemplo.

➤ Com relação ao equipamento

O sistema de variação de parâmetros de soldagem (SVP) desenvolvido se mostrou adequado uma vez que funcionou para o que estava proposto. Embora o sistema tenha sido construído com componentes eletrônicos relativamente simples, ele atendeu o que foi proposto neste trabalho. Reforça-se que a proposta do protótipo apresentada neste trabalho não é a de um produto final que possa ser utilizado em

campo. Obviamente a ideia e os resultados satisfatórios podem vir a criar um produto que seja fisicamente mais robusto e eletronicamente mais sofisticado.

➤ Com relação à metodologia

Conforme apresentado, pouco se sabia a respeito das faixas angulares de transição durante a soldagem de um tubo. A norma AWS A3.0 (2010) se mostrou conservadora em relação ao ângulo limite da posição plana ( $\sim 20^\circ$ ). Foi possível estabelecer que os parâmetros da posição plana conseguem soldar a junta até  $50^\circ$ . Entretanto, o limite da posição vertical de acordo com a norma ( $\sim 100^\circ$ ) coincidiu com o valor limite desta posição estabelecido para o passe de raiz.

A faixa angular obtida experimentalmente para a posição plana tanto para raiz quanto para enchimento, foram coincidentes ( $0^\circ$ - $40^\circ$ ). A transição entre plana e vertical obtida ( $40^\circ$ - $70^\circ$ ), também foi a mesma para os passes de raiz e enchimento. No entanto, na raiz, os parâmetros da posição vertical se limitaram a uma pequena faixa ( $70^\circ$ - $100^\circ$ ), ao contrário do que aconteceu para o enchimento ( $70^\circ$ - $140^\circ$ ).

Na raiz, a faixa angular da sobrecabeça foi a maior ( $120^\circ$ - $180^\circ$ ), uma vez que esta posição foi a limitante. Tanto é verdade que mesmo com a utilização do SVP, a posição sobrecabeça utilizou parâmetros semelhantes ao teste sem variação. Assim, a posição que limitou o aumento da velocidade de alimentação e consequentemente de soldagem na soldagem sem variação foi a posição sobrecabeça.

Já no enchimento, a maior faixa angular ficou com a vertical ( $70^\circ$ - $140^\circ$ ), sendo esta posição a mais crítica. Salienta-se que assim como para a posição sobrecabeça no passe de raiz, a posição vertical no enchimento utilizou os menores valores de velocidade de alimentação e soldagem.

É claro que estas faixas angulares foram obtidas experimentalmente e para a junta proposta na metodologia. No entanto, servem de ponto de partida e de contribuição, uma vez que até mesmo a norma coloca faixas angulares fixas e sem transições.

## 8. TRABALHOS FUTUROS

De forma a ampliar ainda mais o escopo da tese, contribuindo para a utilização de processos GMAW na união de dutos, são propostas as seguintes sugestões de trabalhos futuros:

- Verificar os resultados obtidos com respeito às faixas angulares de transição para tubos de maiores diâmetros, tipos diferentes de juntas e de materiais e mesmo utilizando-se outros processos de soldagem como o TIG e FCAW.
- Aprimorar o SVP para permitir mais uma faixa de transição entre a posição vertical e sobre cabeça. Espera-se que com isso, no enchimento, conseguir-se-ia obter ainda menores tempos de soldagem.
- Projetar e construir um sistema que variasse os parâmetros de soldagem dos processos derivativos do GMAW (STT, RMD e CMT, p.ex.). A razão para tal é que, como para o convencional os resultados já foram bastante satisfatórios, espera-se que se obtenha uma produtividade ainda maior (menores tempos de soldagem).
- Uma das linhas de trabalho do Laprosolda/UFU é a automação assistida, ou seja, utilizando sensores para monitoramento de processos de soldagem, mas o controle é feito pela ação humana. Assim, no contexto da tese, se sugere a utilização de controle assistido com sistema de filmagem para auxiliar na variação dos parâmetros.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, B. A. D.; DUTRA, J. C.; BROERING, C. E. In: 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 2005. Salvador - Brasil. **APLICAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO NA MECANIZAÇÃO DA SOLDAGEM EM SUPERFÍCIES DE TANQUES.** p.6p.

ALTER, D. M. **Using PWM Output as a Digital-to-Analog Converter on a TMS320F280x Digital Signal Controller** Texas Instruments: 32p. p. 2008.

API1104. **API Standard 1104 - Welding of Pipelines and Related Facilities** 2010.

API 5L. **Specification for Line Pipe:** American Petroleum Institute: 180p. p. 2012.

ASTM A370-12. **Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products:** 48p. p. 2012.

ASTM E23-12C. **Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials:** 25p. p. 2012.

AUTOMATIC WELDING SYSTEMS, L., 2009.  
<http://www.weldingbug.com/Gallery/view/Blast-Furnace-Brazil-Project>. 11 de junho de 2014.

AWS A3.0, A. W. S. **Standard Welding Terms and Definitions.** AWS A3.0: 147p. p. 2010.

BARBOSA, L. C. A. **Modos de transferências semi-automáticas para soldagem de passe de raiz:** 8p. p. 2011.

BENWAY, E. A. **Advancements in automatic orbital welding expand its use, provide welders with more option.** Industrial Maintenance & Plant Operation. 61: 5p. p. 2000.

\_\_\_\_\_. **What to Look for in Orbital Welding Training Programs.** Welding Design and Fabrication 2009.

BISHOP, M. **Welding more with less - New technologies take a comprehensive approach to orbital welding operations.** The Fabricator 2008.



BRIOUX, L. Kentucky Power Plant Turns to Orbital Pipe Welding for Expansion. **Welding Journal**, v. 89, n. 6, p. 58, 2010.

BS 7910. **Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures**: 306p. p. 2005.

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

CIMM. Petrobras fala sobre os desafios do pré-sal para o setor de soldagem. Brasil, 2013. [http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir\\_noticia/11063-petrobras-fala-sobre-os-desafios-do-pre-sal-para-o-setor-de-soldagem](http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/11063-petrobras-fala-sobre-os-desafios-do-pre-sal-para-o-setor-de-soldagem). 05/01/2016.

COSTA, T. F. **Aplicação de Processos MAG Curto Circuito Convencional e Controlado na Soldagem de Dutos de Aço Carbono**. 2011. f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia.

CRC-EVANS. 2014. <http://www.crc-evans.com/equipment/welding-equipment/p625>. 11 de junho de 2014.

CUHEL, J. Modified GMAW for root passes. **TPJ - THE TUBE & PIPE JOURNAL**, april/may 2008 2008.

DERUNTZ, B. D. Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer® Welding to Industry. **Journal of Industrial Technology**, v. 19, 2003.

DOMINGUES, C. F. J. R. **Soldagem de Tubulações**. 2004.

DYNATORQUE, T., 2014. [http://www.pipeline-equipment.eu/pipeline-equipment.eu/index7e77.html?option=com\\_content&task=view&id=38&Itemid=1](http://www.pipeline-equipment.eu/pipeline-equipment.eu/index7e77.html?option=com_content&task=view&id=38&Itemid=1). 11 de junho de 2014.

ESAB. **Welding Pipeline Handbook**. 2003.

FAES, K.; DHOOGHE, A.; DE BAETS, P.; AFSCHRIFT, P. New friction welding process for pipeline girth welds-welding time optimization. **The International Journal of Advances Manufacturing Technology**, v. 43, n. 9-10, p. 982-992, 2009.

FENG, J. H. Z. P. H. The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding. **Materials and Design**, v. 30, n. no.5, 2008.

FORTES, C.; DOMINGUES, J. R. Apostila Soldagem de Tubulações In: (Ed.): ESAB, 2004. p.160.

FRONIUS. **CMT: Cold Metal Transfer**. Austria. 2005

GULLCO. 2014. <http://www.westermans.com/downloads/pipe%20kat%20-%20rigid%20track%20brochure.pdf>.

HASHEMI, S. H. **Strength–hardness statistical correlation in API X65 steel**. Materials Science and Engineering. Department of Mechanical Engineering, The University of Birjand: p. p. 2010.

HEINZMAN, B. M. J. **Setting up and determining parameters for orbital tube welding**. The Fabricator. 29: 26-30 p. 1999.

HIMMELBAUER, K. In: IIW ASSEMBLY 2005. Prague. **The CMT Process - A Revolution in Welding Technology**.

ISO 6507-1. **Metallic materials - Vickers hardness test - Part 1: Test method**: 19p. p. 2005.

ISO 9015-2. **Destructive tests on welds in metallic materials - Hardness testing - Part 2: Microhardness testing of welded joints**: 9p. p. 2003.

ISO 17662. **Calibration, verification and validation of equipment used for welding, including ancillary activities**: 31 p. 2005.

KIM, S. J. N. J. W. A Self-organizing fuzzy control approach to arc sensor for weld joint tracking in gas metal arc welding of butt joints. **Welding Journal** v. 72, n. 1, p. 60-66, 1993.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2ª Edição. Wiley, 2003.

KVASOV, F. V. Special Features of Mechanized Welding with Controlled Electrode Metal Transfer. **Weld. J.**, v. 14, p. 158-161, 2000.

KWAK, C. D. Y. M. Multivariable adaptive control of the bead profile geometry in gas metal arc welding with thermal scanning. **Welding journal**, v. 79, n. 4, p. 251-262, 2002.

LAMOND, J.; LEE, K. Y. In: 4<sup>o</sup> MEĐUNARODNO ZNANSTVENO-STRUČNO SAVJETOVANJE - TEHNOLOGIČNA PRIMJENA POSTUPAKA ZAVARIVANJA I ZAVARIVANJU SRODNIH TEHNIKA U IZRADI ZAVARENIH KONSTRUKCIJA I PROIZVODA, 2007. Slavonski Brod. **A COST EFFECTIVE ROOT PASS**. p.10.

LATIFI, H. **Advanced Orbital Pipe Welding**. 2012. 126 f. - Lappeenranta University of Technology, Finlândia.

LI, K. H., J. S. CHEN, Y. M. ZHANG. Double-electrode GMAW Process and Control. **Welding Journal**, v. 86, p. 231-237, 2007.

LIMA, E. J.; TORRES, G. C. F.; FELIZARDO, I.; FILHO, F. A. R.; BRACARENSE, A. Q. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MULTIBODY SYSTEMS AND MECHATRONICS, 2005. Uberlandia (Brazil), . **Development of a Robot for Orbital Welding of Pipes**.

LINCOLN ELETRIC. Surface Tension Transfer (STT). 2005. <http://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/NX220.pdf>. 10 de junho de 2015.

LIRATZIS, T. **Tandem Gas Metal Arc Pipeline Welding**. 2007. f. - Cranfield University.

LOGUE, R. J. B. S. K. C. P. S. The use of vision sensors in multipass welding applications. **Welding Journal**, v. 67, n. 11, p. 28-33, 1988.

LUKKARI, J. Orbital-TIG – a great way to join pipes. **THE ESAB WELDING AND CUTTING JOURNAL** v. VOL. 60, n. NO. 1, p. 3-6, 2005.

LUZ, T. D. S.; RODRIGUES, C. E. A. L.; FERRARESI, V. A. In: SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA - UFU, 2004. Uberlândia. **OBSERVAÇÃO DO EFEITO PINCH NA SOLDAGEM MIG/MAG DO ARAME AWS ER 309L**. . p.8p.

MACHADO, M. V. R.; MOTA, C. P.; FINZI NETO, R. M.; VILARINHO, L. O. In: CONSOLDA 2011, 2011. Natal - RN. **Topologia de Condicionamento de Sinais para Monitoramento de Processos de Soldagem a Arco**.

MAGALHÃES, V. A. N. **SIMULAÇÃO FÍSICA POR RETIFICAÇÃO DA SOLDAGEM DE DUTOS COM PROCESSO GMAW**. 2012. 151 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia.

MAGNATECH. 2014. <http://www.magnatechllc.com/head-pipeliners.php> 11 de junho de 2014.

MELLER, R. N.; DIRENE, H.; GONÇALVES E SILVA, R. H.; DUTRA, J. C. In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE 2014, 2014. Rio de Janeiro. **SOLDAGEM ORBITAL MECANIZADA PARA A UNIÃO DE TUBOS NA CONSTRUÇÃO DE LINHAS DUTOVIÁRIAS**. p.11.

MENDEZ, P. F.; NIECE, K. L.; EAGAR, T. W. **Humping Formation in High Current GTA Welding**. International conference on joining of advanced and speciality materials II. Cincinnati 1999.

MICROCHIP, T. I. P., AMAR. **Using PWM to Generate Analog Output: MICROCHIP**: 4p. p. 1997.

MIGUEZ, R. Malha dutoviária do Brasil está em plena expansão, diz executivo. 2013. <http://tnpetroleo.com.br/noticia/malha-dutoviaria-do-brasil-esta-em-plena-expansao-diz-executivo/>. 07 de junho de 2014.

MILLER. **PipePro Program Management Software (PipeProMgr)** 2005.

\_\_\_\_\_. **PipePro 450 RFC** 2008.

\_\_\_\_\_. **Alimentador de arame PiPePro Dual DX** 2009.

MILLERWELDS. SOFTWARE-DRIVEN RMD PROCESS OVERCOMES SHORT CIRCUITING MIG LIMITATIONS. 2004. 05 de outubro de 2015.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. 2012.

MODENESI, P. V. M. P. J. **Algumas Equações Úteis em Soldagem**. Soldagem e Inspeção. São Paulo. 19 2014.

MOHAMED, A. H. **Laser root welding and Tandem GMAW on X100 steel**. 2005. f. - Cranfield University.

MOON, H. S. B., R.J. . **A Fully Automatic Adaptive Pressure Vessel Welding System** Conference American Welding Society. Chicago 2002.

MOTA, C. P. **Sistema de visão por infravermelho próximo para monitoramento de processos de soldagem a arco**. 2011. 137 f. - UFU - Universidade Federal de Uberlândia.

NASCIMENTO, L. A. D. **AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS GMAW COM TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO CONVENCIONAL E CONTROLADO (STT) APLICADOS NA SOLDAGEM CIRCUNFERENCIAL MECANIZADA**. 2015. 311 f. Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia.

NEEDHAM, J. C. Pulsed Controlled Consumable Electrode Welding Arc. **British Weld. Journal**, v. 12, p. 191-197, 1965.

NORRISH, J. **Advanced Welding Processes**. 1992. f. -, Bristol.

NORRISH, J.; CUIURI, D. The controlled short circuit GMAW process: A tutorial. **Journal of Manufacturing Processes**, p. 7, 2013.

ORDOÑEZ, R. Petrobras reduz investimentos até 2019 em 24,5%, para US\$ 98,4 bi. Brasil, 2016. <http://oglobo.globo.com/economia/petroleo-e-energia/petrobras-reduz-investimentos-ate-2019-em-245-para-us-984-bi-18454655>. 05/01/2016.

PAL, K.; PAL, S. K. Effect of pulse parameters on weld quality in pulsed gas metal arc welding. **Jornal of Materials Engineering and Performance**, v. 20, p. 918-931, 2011.

PÉPE, N. V. D. C. **Advances in Gas Metal Arc Welding and Application to Corrosion Resistant Alloy Pipes**. 2010. 546p. f. - Cranfield University.

PEREIRA, W. A. **Comparação de Características Operacionais entre os Processos MIG Pulsado e MAG Curto-Circuito**. 1995. f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia.

PETROBRÁS. 2014. <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/gasodutos/sao-paulo.htm>. 07 de junho de 2014.

PIGOZZO, I. O. **SOLDAGEM TIG ORBITAL: OTIMIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS E PROSPECÇÕES TÉCNOLÓGICAS PARA PROCEDIMENTOS DE PASSE DE RAÍZ**. 2015. 134 f. - Universidade Federal de Santa Catarina.

POLYSOUDE. 2014. <http://www.polysoude.com/polycar-mp-pipe>. 11 de junho de 2014.

PONOMAREV, A. S. V. **Soldagem MIG/MAG**. Artliber Ed, 2008.

PORTALG1. Entenda a Operação Lava Jato. Brasil, 2015. <http://g1.globo.com/politica/noticia/2014/04/entenda-operacao-lava-jato-da-policia-federal.html>. 06/01/2016.

POSSEBON, S. **Utilização de MIG/MAG com curto-circuito controlado na soldagem em operação**. 2009. 132p. f. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

RODRIGUES, F. Rio Pipeline 2013: Expansão da malha dutoviária requer mão de obra qualificada. 2013. <http://www.petroleoenergia.com.br/petroleo/rio-pipeline-2013-expansao-da-malha-dutoviaria-requer-mao-de-obra-qualificada/>. 07 de junho de 2014.

SORAGI, C. C. **Estudo paramétrico de soldagem orbital de tubulações com o processo FCAW**. 2004. f. - Universidade Federal de Minas Gerais.

STAVA, E. K. Waveform Control Speeds Root Pass. **Welding Design and Fabrication**, v. 74, p. 39-41, 2001.

TORBATI, A. M., R. M. MIRANDA, L. QUINTINO, S. WILLIAMS, DAVID YAPP. Optimization Procedures for GMAW of bimetal pipes. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 21, p. 1112-1116, 2011.

VARGAS, J. E. A. **AValiação de processos MIG/MAG derivativos utilizando-se simulador de soldagem de dutos por retificação**. 2013. 173 f. Tese de doutorado - UNB, Brasil.

VEL MURUGAN, V.; GUNARAJ, V. Effects of Process Parameters on Angular Distortion of Gas Metal Arc Welded Structural Steel Plates. **Welding Journal**, v. 84, p. 165-171, 2005.

VIETZ, E., H. KOHN, C. THOMY, F. VOLLERTSEN. **The VPL® fiber laser system - an innovation in the welding technology for pipeline construction**. Pipeline Technology Conference. Hannover 2006.

VILARINHO, L. O. **Modos Fundamentais De Transferência Metálica: Naturais E Controlados**. Revista da soldagem 2007.

## 10. APÊNDICE I: PSEUDO-CÓDIGO DOS PROGRAMAS DO PIC1 E PIC2

1. Ligar a fonte da Miller e ajustar o programa a ser utilizado (indutância e Valim.). O valor de tensão será ajustado externamente.
2. Comutar as chaves de seleção para controle externo e conferir no display se o botão referente à Valim está selecionado e com o valor inicial.
3. Levar o Tartílope para a posição inicial ( $0^\circ$ ) e antes de comutar a chave para controle externo, apertar o botão para o lado em que ele deve andar. Caso o último botão apertado seja X+, quando acionar o controle externo o V4 vai movimentar na direção de X+.

Caso o último botão apertado seja X-, o V4 irá andar na direção de X- quando o controle externo for acionado.

4. Preencher a tabela nos programas Vs.c e U\_e\_Valim.c.

POSIÇÃO		Parâmetros		
		Tensão [V]	Valim [m/min]	Vsold [cm/min]
<b>plana</b>	S0-S1	A	D	G
trans. P-V	S1-S2	-	-	-
<b>vertical</b>	S2-S3	B	E	H
trans. V-SC	S3-S4	-	-	-
<b>sobrecabeça</b>	S4-S5	C	F	I

Raio da circunferência onde ocorre o contato do arame [cm]  
J

### O QUE DEVE TER NO PROGRAMA:

1. Leitura do ângulo  $\Theta$ .
2. Em função da faixa em que o  $\Theta$  se encontrar, executar cada um dos casos abaixo:

#### if S0 $\leq$ $\Theta$ < S1 – Parâmetros fixos

Tensão: configurar uma saída PWM com um valor de tensão médio aplicado proporcional ao valor de tensão de soldagem desejado. Foi realizada uma calibração e levantada uma curva de calibração em Excel:

*duty\_tensao = 13.972\*A – 131.44 (esse valor permanece constante durante toda essa faixa de  $\Theta$ )*

Valim: Nessa faixa de  $\Theta$  o programa não envia nenhum valor, pois já foi regulado inicialmente e durante toda a faixa de  $\Theta$  (S0-S1) o valor de Valim é igual à D.

Vsold: configurar uma saída *PFM* a ser enviado ao driver do motor x do Tartilope. Como o V4 anda em um movimento circular (orbital), para um dado valor de tensão aplicado, sua velocidade angular é constante, mas sua velocidade escalar, que é a de soldagem, varia conforme o raio do tubo (onde também entra a altura da tocha em relação ao tubo). Diante disso, o valor dessa distância entre o ponto central do movimento (centro do tubo) e o ponto onde o arame toca o tubo (valor esse dado em cm), deve ser especificado também antes de se iniciar o programa (valor J).

$$vel\_ang = G/J;$$

*PR2 = 288.07\*pow(vel\_ang,-1.024); ajusta-se o valor de período do timer2*

*setup\_timer\_2(T2\_DIV\_BY\_16,PR2,1); configure-se o timer2*

*duty\_Vsold = PR2/2; ajusta-se o valor de duty para onda quadrada*

*set\_pwm2\_duty(duty\_Vsold); envia-se o sinal correspondente (esse sinal permanece constante durante toda essa faixa de  $\Theta$ )*

### **if S1 < $\Theta$ <= S2 (TRANSIÇÃO) – Parâmetros variáveis**

Tensão: O valor de tensão de soldagem deve variar entre A e B linearmente. Da mesma forma, o *duty\_tensao* correspondente também deverá variar entre *13.972\*A – 131.44* e *13.972\*B – 131.44* de forma linear. Com isso, será realizada uma interpolação linear entre *duty\_Ui* e *duty\_Uf* que deverão variar conforme o ângulo  $\Theta$  varia entre S1 e S2.

$$duty\_Ui = 13.972*Uini-131.44;$$



$$duty\_Uf = 13.972 * Ufim - 131.44;$$

$S1$	$duty\_Ui$
$\Theta$	$duty\_tensao$
$S2$	$duty\_Uf$

$$duty\_tensao(\Theta) = ((\Theta - S2) * (duty\_Ui - duty\_Uf)) / (S1 - S2) + duty\_Uf;$$

Esse valor de *duty\_tensao* após convertido em tensão (e dobrado – 0 à 10V) é o valor enviado à fonte que modifica o valor da tensão de soldagem aplicada em função do valor do ângulo  $\Theta$ . Sendo assim, à medida que o valor de  $\Theta$  varia de  $S1$  à  $S2$ , o valor de tensão de soldagem varia entre A e B.

Valim: A partir de uma calibração realizada (Excel), para a fonte da Miller variar a Valim em 0,1m/min, é necessário enviar à ela 4 pulsos completos (8 bordas). Entretanto, como o circuito que gera os sinais defasados de 90° reduz a frequência de entrada pela metade, para que dele saiam 4 pulsos, devem nele entrar 8 pulsos (16 bordas) para cada 0,1m/min. Deve-se habilitar duas saídas digitais do PIC. Uma para dizer se a velocidade deve aumentar (nível alto), ou deve diminuir (nível baixo). A outra irá alternar sua saída em nível alto e baixo de forma a gerar a quantidade necessária de pulsos para se variar a Valim no intervalo que se deseja:

```

Direção = E – D;
if direção > 0
output_high (saída_1);
else
output_low (saída_1);

```

Com essa parte anterior, é definido se o trem de pulso a ser enviado pela saída\_2 será utilizado para aumentar ou diminuir a Valim. Com a parte seguinte, é enviado o número de pulsos desejados no intervalo de  $S1$  à  $S2$ . Sabendo-se a cada quantos graus deve-se enviar um pulso, lê-se o valor do ângulo e quando chegar em múltiplo desse valor, manda-se 1 pulso.

```

Quant_pulsos = módulo (direção) *10*8;
Theta_transição = S2 – S1;
Θ_incremental = S2 – S1 / Quant_pulsos;

if (Θ == Theta_transição) //Caso fique instável (não acerte o valor
                               exato), fazer algo como um intervalo)

{
    output_high (saída_2);
    Delay ( 10 ms); // verificou-se que a fonte muda o valor da
    Valim no display nessa frequência;
    output_low (saída_2);
    Delay ( 10 ms);
    Theta_transição = Θ+ Θ_incremental;
}

```

Vsold: A velocidade de soldagem escalar deve variar entre G e H linearmente. Entretanto, deve-se calcular a velocidade angular correspondente para G ( $vel\_ang\_i = G/J$ ) e H ( $vel\_ang\_f = H/J$ ). Em seguida, o  $PR2\_i$  que ajusta a frequência do PFM correspondente a velocidade G deverá variar entre  $288.07 * pow(vel\_ang\_i, -1.024)$  e o  $PR2\_f$  correspondente a H deverá variar entre  $288.07 * pow(vel\_ang\_f, -1.024)$  de forma linear. Com isso, será realizada uma interpolação linear entre a  $PR2$  inicial e final que deverá variar conforme o ângulo  $\Theta$  varia entre S1 e S2.

$$vel\_ang\_i = Vini/J;$$

$$vel\_ang\_f = Vfim/J;$$

$$PR2\_i = 288.07 * pow(vel\_ang\_i, -1.024);$$

$$PR2\_f = 288.07 * pow(vel\_ang\_f, -1.024);$$

S1	$vel\_ang\_i$
$\Theta$	$U\_v$
S2	$vel\_ang\_f$

$$PR2(\Theta) = ((\Theta - S2) * (PR2\_i - PR2\_f)) / (S1 - S2) + PR2\_f;$$

*Esse valor de PR2 configura o timer2 que envia o PFM ao driver do motor x do Tartílope que modifica o valor da velocidade de soldagem aplicada em função do valor do ângulo  $\Theta$ . Sendo assim, à medida que o valor de  $\Theta$  varia de S1 à S2, o valor da velocidade de soldagem varia entre G e H.*

### **if S2 < $\Theta$ <= S3**

Tensão: Uma saída PWM já foi configurada para a etapa onde  $\Theta$  (S0-S1) e agora basta escrever o valor do *duty* que deve ser aplicado proporcionalmente ao valor de tensão de soldagem desejado:

$$duty\_tensao = 13.972*B - 131.44 \text{ (esse valor permanece constante durante toda essa faixa de } \Theta \text{)}$$

Valim: Nessa faixa de  $\Theta$  o programa não envia nenhum valor, pois depois da faixa de transição  $\Theta$  (S1 – S2) o valor de Valim já mudou de D para E.

Vsold: Configurar o valor de PR2 correspondente ao valor de velocidade de soldagem desejado:

$$vel\_ang = H/J;$$

$$PR2 = 288.07 * pow(vel\_ang, -1.024); \text{ ajusta-se o valor de período do timer2}$$

$$setup\_timer\_2(T2\_DIV\_BY\_16, PR2, 1); \text{ configure-se o timer2}$$

$$duty\_Vsold = PR2/2; \text{ ajusta-se o valor de duty para onda quadrada}$$

$$set\_pwm2\_duty(duty\_Vsold); \text{ envia-se o sinal correspondente (esse sinal permanece constante durante toda essa faixa de } \Theta \text{)}$$

### **if S3 < $\Theta$ <= S4 (TRANSIÇÃO)**

Tensão: O valor de tensão de soldagem deve variar entre B e C linearmente. Da mesma forma, o *duty\_tensao* correspondente também deverá

variar entre  $13.972*B - 131.44$  e  $13.972*C - 131.44$  de forma linear. Com isso, será realizada uma interpolação linear entre  $duty\_Ui$  e  $duty\_Uf$  que deverão variar conforme o ângulo  $\Theta$  varia entre S3 e S4.

$$duty\_Ui = 13.972*Uini - 131.44;$$

$$duty\_Uf = 13.972*Ufim - 131.44;$$

S3	$duty\_Ui$
$\Theta$	$duty\_tensao$
S4	$duty\_Uf$

$$duty\_tensao(\Theta) = ((\Theta - S4) * (duty\_Ui - duty\_Uf)) / (S3 - S4) + duty\_Uf;$$

Esse valor de  $duty\_tensao$  após convertido em tensão (e dobrado – 0 à 10V) é o valor enviado à fonte que modifica o valor da tensão de soldagem aplicada em função do valor do ângulo  $\Theta$ . Sendo assim, à medida que o valor de  $\Theta$  varia de S3 à S4, o valor de tensão de soldagem varia entre B e C.

Valim:

```

Direção = F – E;
if direção > 0
output_high (saída_1);
else
output_low (saída_1);

```

Com essa parte anterior, é definido se o trem de pulso a ser enviado pela saída\_2 será utilizado para aumentar ou diminuir a Valim. Com a parte seguinte, é enviado o número de pulsos desejados no intervalo de S3 à S4. Sabendo-se a cada quantos graus deve-se enviar um pulso, lê-se o valor do ângulo e quando chegar em múltiplo desse valor, manda-se 1 pulso.

$$Quant\_pulsos = \text{módulo}(\text{direção}) * 10 * 8;$$

$$\Theta\_transição = S4 - S3;$$

$$\Theta\_incremental = S4 - S3 / Quant\_pulsos;$$

```
if (Θ == Theta_transição) //Caso fique instável (não acerte o valor
                                exato), fazer algo como um intervalo
```

```
{
    output_high (saída_2);
    Delay ( 10 ms); // verificou-se que a fonte muda o valor da
    Valim no display nessa frequência;
    output_low (saída_2);
    Delay ( 10 ms);
    Theta_transição = Θ+ Θ_incremental;
}
```

Vsold: A velocidade de soldagem escalar deve variar entre H e I linearmente. Entretanto, deve-se calcular a velocidade angular correspondente para H ( $vel\_ang\_i = H/J$ ) e I ( $vel\_ang\_f = I/J$ ). Em seguida, o  $PR2\_i$  que ajusta a frequência do PFM correspondente a velocidade H deverá variar entre  $288.07 * pow(vel\_ang\_i, -1.024)$  e o  $PR2\_f$  correspondente a I deverá variar entre  $288.07 * pow(vel\_ang\_f, -1.024)$  de forma linear. Com isso, será realizada uma interpolação linear entre a  $PR2$  inicial e final que deverá variar conforme o ângulo  $\Theta$  varia entre S3 e S4.

$$vel\_ang\_i = Vini/J;$$

$$vel\_ang\_f = Vfim/J;$$

$$PR2\_i = 288.07 * pow(vel\_ang\_i, -1.024);$$

$$PR2\_f = 288.07 * pow(vel\_ang\_f, -1.024);$$

S3	$vel\_ang\_i$
$\Theta$	$U_v$
S4	$vel\_ang\_f$

$$PR2(\Theta) = ((\Theta - S4) * (PR2\_i - PR2\_f)) / (S3 - S4) + PR2\_f;$$

*Esse valor de PR2 configura o timer2 que envia o PFM ao driver do motor x do Tartilope que modifica o valor da velocidade de soldagem*

*aplicada em função do valor do ângulo  $\Theta$ . Sendo assim, à medida que o valor de  $\Theta$  varia de S3 à S4, o valor da velocidade de soldagem varia entre H e I.*

### **if $\Theta > S4$**

Tensão: Uma saída *PWM* já foi configurada para a etapa onde  $\Theta$  (S0-S1) e agora basta escrever o valor do *duty* que deve ser aplicado proporcionalmente ao valor de tensão de soldagem desejado:

$$duty\_tensao = 13.972 * C - 131.44 \text{ (esse valor permanece constante durante toda essa faixa de } \Theta \text{)}$$

Valim: Nessa faixa de  $\Theta$  o programa não envia nenhum valor, pois depois da faixa de transição  $\Theta$  (S3 – S4) o valor de Valim já mudou de E para F.

Vsold: Configurar o valor de PR2 correspondente ao valor de velocidade de soldagem desejado:

$$vel\_ang = I/J;$$

$$PR2 = 288.07 * pow(vel\_ang, -1.024); \text{ ajusta-se o valor de período do timer2}$$

$$setup\_timer\_2(T2\_DIV\_BY\_16, PR2, 1); \text{ configure-se o timer2}$$

$$duty\_Vsold = PR2/2; \text{ ajusta-se o valor de duty para onda quadrada}$$

$$set\_pwm2\_duty(duty\_Vsold); \text{ envia-se o sinal correspondente (esse sinal permanece constante durante toda essa faixa de } \Theta \text{)}$$

## 11. APÊNDICE II: PROGRAMA GRAVADO NO PIC1

```

#include <16F877A.h>
#define adc=10
#FUSES NOWDT           //No Watch Dog Timer
#FUSES HS              //High speed Osc (> 4mhz)
#FUSES NOPUT          //No Power Up Timer
#FUSES NOPROTECT       //Code not protected from reading
#FUSES NODEBUG         //No Debug mode for ICD
#FUSES NOBROWNOUT     //No brownout reset
#FUSES NOLVP          //No low voltage prgming, B3(PIC16) or B5(PIC18) used for I/O
#FUSES NOCPD          //No EE protection
#FUSES NOWRT          //Program memory not write protected
#use delay(clock=2000000)
#use rs232(baud=38400,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8)
#include <Flex_LCD420.c>
#include <math.h>

// COLOQUE ESTA LINHA EM TODOS OS PROGRAMAS ANTES DO MAIN
////////////////////
//////// PARA GRAVAÇÃO ATAVÉS DO BOOT_RS232 ///////////////////////////////////

#org 0x1F00, 0x1FFF void loader16F877A(void)

////////////////////

int contador=0;

float sinal_sensor, tetha, tetha_atual, sinal_lido, sinal_acumulado;
int16 contador_timer=0; // variável criada para ser incrementada de 1 toda vez que houver o int
i=0;                    // overflow do timer0
int16 duty_tensao;

int1 flag_2;

int S0 = 0,           // Meia cana do tubo discretizada em ângulo para definir as posições:
    S1 = 40,         // plana, vertical descendente, sobrecabeça
    S2 = 70,
    S3 = 90,
    S4 = 120,
    S5 = 180;

//////////////////// PARÂMETROS //////////////////////////////////////
////////////////////
//////// TENSÃO [V] // Valim [m/min] //////////////////////////////////////
////////////////////
float Up=31.5 ,   Va_p=8.0 ; // plana [S0 à S1] //
////////////////////
float Uv=24.0 ,   Va_v=7.0 ; // vertical [S2 à S3] //
////////////////////
float Us=21.5 ,   Va_s=5.0 ; // sobrecabeça [S4 à S6] //
////////////////////

// Controle do tempo de amostragem de 100ms //////////////////////////////////////
//O inclinômetro tem um tempo de resposta de 100ms////////////////////////////////////

```

```

#int_RTCC          //função da interrupção timer0

void RTCC_isr(void)
{
    contador_timer++; //incrementação da variável contador
    set_timer0(6); //inicializa o valor do timer0 em 6.

    if(contador_timer==6 && i<10){ // Será amostrado um valor a cada 10ms e a cada 10 valores
será feita uma média.
        contador_timer=0;          // zera o contador para somente entrar aqui denovo após 10ms
        i++;
        set_adc_channel{1104, #4}; // Para ler o valor de tensão do canal AN0 (pino 2 do
16F887A)
        delay_us(20);
        sinal_lido = read_adc();          //lê o valor de tensão e guarda ele na variável tensao_lida
        sinal_acumulado = sinal_lido + sinal_acumulado; //acumula o valor de tensao das 10
amostras na variavel tensao_acumulada

        if(i==10) { // Quando i=10 é porque já amostrou 10 valores

            sinal_sensor = sinal_acumulado/10.0; // obtém-se o valor de tensão média em 100 ms (a
partir de 10 amostras)
            contador_timer=0;
            i=0; // zera o valor de i para somente entrar aqui denovo quando já amostrou 10 vezes
            sinal_acumulado = 0; // limpa o valor da variável tensão_acumulada para que possa ser
novamente usada
            tetha = sinal_sensor*0.2597-52.727;
        }
    }
}

void inicia_pic(void)
{
    lcd_init();
    setup_adc_ports(AN0);
    setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_4);
    setup_psp(PSP_DISABLED);
    setup_spi(SPI_SS_DISABLED);
    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_8_BIT|RTCC_DIV_8); // estouro em 10 ms
    enable_interrupts(INT_RTCC);
    enable_interrupts(GLOBAL);
    setup_timer_1(T1_DISABLED);
    setup_timer_2(T2_DIV_BY_4,124,1); // setup_timer_2(T2_DIV_BY_TMR2,PR2,1);
    setup_ccp1(CCP_PWM);
    set_pwm1_duty{1104, #4};
    setup_comparator(NC_NC_NC_NC);
    setup_vref(FALSE);
}

void tela_inicializacao (void)
{
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc(" de Parametros para ");
    lcd_gotoxy(1,2);
    lcd_putc(" Circunferencial ");
    lcd_gotoxy(1,3);
    lcd_putc(" ");
    lcd_gotoxy(1,4);
    lcd_putc("LAPROSOLDA/UFU 2015");
}

```



```

delay_ms(3000);
}

void tela_parametros (void)
{
  lcd_gotoxy(1,1);
  lcd_putc("  de Parametros  ");
  lcd_gotoxy(1,2);
  printf(lcd_putc," %.1f V %.1f m/min  ", Up, Va_p);
  lcd_gotoxy(1,3);
  printf(lcd_putc," %.1f V %.1f m/min  ", Uv, Va_v);
  lcd_gotoxy(1,4);
  printf(lcd_putc," %.1f V %.1f m/min  ", Us, Va_s);
  delay_ms(5000);
  lcd_gotoxy(1,1);
  lcd_putc("          ");
  lcd_gotoxy(1,2);
  lcd_putc("          ");
  lcd_gotoxy(1,3);
  lcd_putc("          ");
  lcd_gotoxy(1,4);
  lcd_putc("aperte o botao preto");
  delay_ms(1500);
}

void tela_pos_inicial (void)
{
  lcd_gotoxy(1,1);
  lcd_putc("          ");
  lcd_gotoxy(1,2);
  lcd_putc("          ");
  lcd_gotoxy(1,3);
  lcd_putc("Ao terminar acione o");
  lcd_gotoxy(1,4);
  lcd_putc("o botao vermelho... ");
}

void tela_disparo (void)
{
  lcd_gotoxy(1,1);
  lcd_putc("          ");
  lcd_gotoxy(1,2);
  lcd_putc("          ");
  lcd_gotoxy(1,3);
  lcd_putc("          ");
  lcd_gotoxy(1,4);
  lcd_putc("          disparo..");
}

void angulo_crescente (void)
{
  if (tetha>tetha_atual)
  { tetha_atual = tetha;}
  else
  { tetha_atual = tetha_atual;}

  if ( (tetha_atual >= S0) && (tetha_atual <= S1) )
  {

```

```

    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc("          ");
    lcd_gotoxy(1,2);
    lcd_putc("  Posicao Plana  ");
    lcd_gotoxy(1,3);
    lcd_putc("          ");
    lcd_gotoxy(1,4);
    lcd_putc("          ");
  }
  if ( (tetha_atual > S1) && (tetha_atual <= S2) )
  {
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc("          ");
    lcd_gotoxy(1,2);
    lcd_putc("  Transicao entre  ");
    lcd_gotoxy(1,3);
    lcd_putc("  Plana e Vertical ");
    lcd_gotoxy(1,4);
    lcd_putc("          ");
  }
  if ( (tetha_atual > S2) && (tetha_atual <= S3) )
  {
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc("          ");
    lcd_gotoxy(1,2);
    lcd_putc("  Posicao Vertical ");
    lcd_gotoxy(1,3);
    lcd_putc("          ");
    lcd_gotoxy(1,4);
    lcd_putc("          ");
  }
  if ( (tetha_atual > S3) && (tetha_atual <= S4) )
  {
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc("          ");
    lcd_gotoxy(1,2);
    lcd_putc("  Transicao entre  ");
    lcd_gotoxy(1,3);
    lcd_putc("  Vertical e      ");
    lcd_gotoxy(1,4);
    lcd_putc("  Sobrecabeca  ");
  }
  if (tetha_atual >= S4)
  {
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc("          ");
    lcd_gotoxy(1,2);
    lcd_putc("  Posicao Sobrecabeca");
    lcd_gotoxy(1,3);
    lcd_putc("          ");
    lcd_gotoxy(1,4);
    lcd_putc("          ");
  }
}

void parametros_fixos (float U)          //parametros_fixos_tensao recebe U e retorna um int
duty_tensao;
{
  //int16 duty_tensao;

```

```

    duty_tensao = 13.972*U-131.44;
    set_pwm1_duty(duty_tensao);

}

void parametros_variaveis (float Uini, float Ufim, float Va_ini, float Va_fim,
                           float Si, float Sf)
{
    //int16 duty_tensao;
    float duty_Ui, duty_Uf;

    float direcao, quant_pulsos, faixa_transicao, tetha_incremental, tetha_transicao;

    // PARTE DA TENSÃO DE SOLDAGEM //

    duty_Ui = 13.972*Uini-131.44;
    duty_Uf = 13.972*Ufim-131.44;
    duty_tensao = (((tetha-Sf)*(duty_Ui-duty_Uf))/(Si-Sf))+duty_Uf;
    set_pwm1_duty(duty_tensao);

    // PARTE DA VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO //

    direcao = Va_fim - Va_ini;
    if (direcao>0)
        {output_high(pin_D0);} // quando o pino D0 está alto, a Valim está
aumentando;
    else {output_low(pin_D0);} // quando o pino D0 está baixo, a Valim está
diminuindo;

    quant_pulsos = (fabs(direcao)*10*8)/4; // fabs() tira o módulo de uma variável float;
    faixa_transicao = Sf-Si;
    tetha_incremental = faixa_transicao/(quant_pulsos);
    tetha_transicao = Si + tetha_incremental*contador;

    if ((tetha>=tetha_transicao) && (contador<quant_pulsos))
    {
        output_high(pin_D1);
        delay_ms{1104, #4};
        output_low(pin_D1);
        delay_ms(API1104);
        output_high(pin_D1);
        delay_ms(API1104);
        output_low(pin_D1);
        delay_ms(API1104);
        output_high(pin_D1);
        delay_ms(API1104);
        output_low(pin_D1);
        delay_ms(API1104);
        output_high(pin_D1);
        delay_ms(API1104);
        output_low(pin_D1);
        delay_ms(API1104);
        contador++;
    }

}

void main()
{

```

```

        inicia_pic(); // chama a função que apenas roda seu código sem retornar
nenhum valor;
        tela_inicializacao (); // Chama a função que imprime a tela de inicialização no
LCD;

        while(TRUE)
        {

            while (!input(PIN_A2)) //SELEÇÃO DO MODO DE VISUALIZAÇÃO DE
PARÂMETROS// ENQUANTO ESTIVER APERTANDO O BOTAO A2 (JUMPEANDO GND).
            { tela_parametros (); }

            if (input(PIN_A2)) //SELEÇÃO DO MODO AUTOMÁTICO (VARIAÇÃO DOS
PARAMETROS EM FUNÇÃO DE TETHA)
            {
                tela_pos_inicial ();
                tetha_atual=0;

                while(!input(PIN_A1)) // SE ESTE PINO ESTIVER HABILITADO O PROGRAMA
FICARÁ AGUARDANDO O DISPARO! Esse pino habilita o disparo!
                {

                    tela_disparo ();
                    flag_2=1;
                    set_pwm1_duty{1104, #4};
                    tetha_atual=0;

                    while(!input(PIN_A3)) // ESSE PINO DISPARA O PROGRAMA!
                    {

                        while ( (tetha_atual >= S0) && (tetha_atual <= S1) ) // para a faixa de S0 à S1
(planar)
                        {
                            angulo_crescente ();
                            parametros_fixos (Up);
                            if (input(PIN_A3))
                            {break;}
                        }

                        while ( (tetha_atual > S1) && (tetha_atual <= S2) ) // para a faixa de S1 à S2
(transição plana-vertical)
                        {
                            angulo_crescente ();
                            parametros_variaveis (Up, Uv, Va_p, Va_v, S1, S2);
                            if (input(PIN_A3))
                            {break;}
                        }

                        contador = 0;

                        while ( (tetha_atual > S2) && (tetha_atual <= S3) ) // para a faixa de S0 à S1
(vertical)
                        {
                            angulo_crescente ();
                            parametros_fixos (Uv);
                            if (input(PIN_A3))
                            {break;}
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```

while ( (tetha_atual > S3) && (tetha_atual <= S4) )      // para a faixa de S3 à S4
(transição vertical-sobrecabeça)
{
    angulo_crescente ();
    parametros_variaveis (Uv, Us, Va_v, Va_s, S3, S4);
    if (input(PIN_A3))
    {break;}
}

while (tetha_atual >= S4)                                // para a faixa de S0 à S1
(sobrecabeça)
{
    angulo_crescente ();
    parametros_fixos (Us);
    if (input(PIN_A3))
    {break;}
}
}
}
}
}
}
}
}

```

## 12. APÊNDICE III: PROGRAMA INSERIDO NO PIC2

```

#include <16F877A.h>
#define adc=10
#define fuses XT, NOWDT, NOPROTECT, BROWNOUT, PUT, NOLVP
#define use delay(clock=20000000)
#define use rs232(baud=38400,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8)

#include <Flex_LCD.c>
#include <math.h>

// COLOQUE ESTA LINHA EM TODOS OS PROGRAMAS ANTES DO MAIN
////////////////////
//////// PARA GRAVAÇÃO ATAVÉS DO BOOT_RS232 //////////
//org 0x1F00, 0x1FFF void loader16F877A(void) { }

////////////////////

int contador=0;
float sinal_sensor, tetha, tetha_atual, sinal_lido, sinal_acumulado;
int16 contador_timer=0; //variável criada para ser incrementada de 1 toda vez que houver o
overflow do timer0
int i=0;
int PR2, PR2_atual;

int S0 = 0,      // Meia cana do tubo discretizada em ângulo para definir as posições:
  S1 = 40,      // plana, vertical descendente, sobrecabeça
  S2 = 70,
  S3 = 90,
  S4 = 120,
  S5 = 180;

//////// PARÂMETROS //////////
////////////////////
//////// Vsold [cm/min] //////////
////////////////////
float Vs_p=81.6 ; // plana [S0 à S1] //
////////////////////
float Vs_v=59.5 ; // vertical [S2 à S3] //
////////////////////
float Vs_s=39.2 ; // sobrecabeça [S4 à S6] //
////////////////////

////////////////////
// RAIOS DA CIRCUNFERÊNCIA ONDE OCORRE O CONTATO DO ARAME COM A
PEÇA [CM] //////////
////////////////////
float J= 10.3; // Se for para raiz é 10.3
////////////////////

// Controle do tempo de amostragem de 100ms //////////

```

```

//O inclinômetro tem um tempo de resposta de 100ms////////////////////////////////
int_RTCC          //função da interrupção timer0

void RTCC_isr(void)
{
    contador_timer++; //incrementação da variável contador
    set_timer0(6); //inicializa o valor do timer0 em 6.

    if(contador_timer==6 && i<10){ // Será amostrado um valor a cada 10ms e a cada 10 valores
será feita uma média.
        contador_timer=0;          // zera o contador para somente entrar aqui denovo após 10ms
        i++;
        set_adc_channel{1104, #4}; // Para ler o valor de tensão do canal AN0 (pino 2 do
16F887A)
        delay_us(20);
        sinal_lido = read_adc();      //lê o valor de tensão e guarda ele na variável tensao_lida
        sinal_acumulado = sinal_lido + sinal_acumulado; //acumula o valor de tensao das 10
amostras na variavel tensao_acumulada

        if(i==10) { // Quando i=10 é porque já amostrou 10 valores

            sinal_sensor = sinal_acumulado/10.0; // obtém-se o valor de tensão média em 100 ms (a
partir de 10 amostras)
            contador_timer=0;
            i=0; // zera o valor de i para somente entrar aqui denovo quando já amostrou 10 vezes
            sinal_acumulado = 0; // limpa o valor da variável tensão_acumulada para que possa ser
novamente usada
            tetha = sinal_sensor*0.2597-52.727;
        }
    }
}

void inicia_pic(void)
{
    lcd_init();
    setup_adc_ports(AN0);
    setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_4);
    setup_psp(PSP_DISABLED);
    setup_spi(SPI_SS_DISABLED);
    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_8_BIT|RTCC_DIV_8); // estouro em 10 ms

    clear_interrupt(INT_RTCC;
    enable_interrupts(INT_RTCC);
    enable_interrupts(GLOBAL);

    setup_ccp2(CCP_PWM);
    set_pwm2_duty{1104, #4};
    setup_comparator(NC_NC_NC_NC);
    setup_vref(FALSE);
}

void angulo_crescente (void)
{
    if (tetha>tetha_atual)
    { tetha_atual = tetha;}
    else
    { tetha_atual = tetha_atual;}
}

```

```

    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc("          ");
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc,"ANGULO = %.0f GRAUS  ", tetha_atual);
    lcd_gotoxy(1,3);
    lcd_putc("          ");
    lcd_gotoxy(1,4);
    lcd_putc("          ");
}

```

```

void tela_inicializacao (void)
{
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc(" Sistema de Variacao");
    lcd_gotoxy(1,2);
    lcd_putc(" Soldagem  ");
    lcd_gotoxy(1,3);
    lcd_putc("          ");
    lcd_gotoxy(1,4);
    lcd_putc(" Victor Augusto  ");
    delay_ms(3000);
}

```

```

void tela_parametros (void)
{
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc("Tela de Visualizacao");
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc," %u-%u  %.1f cm/min",S0,S1,Vs_p);
    lcd_gotoxy(1,3);
    printf(lcd_putc," %u-%u  %.1f cm/min",S2,S3,Vs_v);
    lcd_gotoxy(1,4);
    printf(lcd_putc,"%u-%u  %.1f cm/min",S4,S5,Vs_s );
    delay_ms(5000);
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc("          ");
    lcd_gotoxy(1,2);
    lcd_putc("          ");
    lcd_gotoxy(1,3);
    lcd_putc("          ");
    lcd_gotoxy(1,4);
    lcd_putc("P/ habilitar a solda");
    delay_ms(1500);
}

```

```

void tela_disparo (void)
{
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc("          ");
    lcd_gotoxy(1,2);
    lcd_putc("          ");
    lcd_gotoxy(1,3);
    lcd_putc("          ");
    lcd_gotoxy(1,4);
    lcd_putc("          Aguardando");
}

```

```

void tela_pos_inicial (void)
{

```



```

        lcd_gotoxy(1,1);
        lcd_putc("Ajuste manualmente o");
        lcd_gotoxy(1,2);
        lcd_putc("V4 p/posicao inicial");
        lcd_gotoxy(1,3);
        lcd_putc("          ");
        lcd_gotoxy(1,4);
        printf(lcd_putc," ANGULO = %.0f GRAUS  ", tetha);

    }

    void parametros_fixos (float Vs, float J)          //parametros_fixos_tensao recebe U e retorna
    um int duty_tensao;
    {
        float vel_ang;
        int duty_Vsold;

        vel_ang = Vs/J;
        PR2= 288.07*pow(vel_ang,-1.024);
        setup_timer_2(T2_DIV_BY_16,PR2,1);          // setup_timer_2(T2_DIV_BY_TMR2,PR2,1);
        duty_Vsold = PR2/2;
        set_pwm2_duty(duty_Vsold);
        printf("%u \n\r", PR2);
    }

    void parametros_variaveis (float Vini, float Vfim, float Si, float Sf, float J)
    {
        float vel_ang_i, vel_ang_f, PR2_i, PR2_f;
        int duty_Vsold;

        // PARTE DA VELOCIDADE DE SOLDAGEM //
        vel_ang_i = Vini/J;
        vel_ang_f = Vfim/J;

        PR2_i = 288.07*pow(vel_ang_i,-1.024);
        PR2_f = 288.07*pow(vel_ang_f,-1.024);
        PR2 = (((tetha-Sf)*(PR2_i-PR2_f))/(Si-Sf))+PR2_f;

        if ((PR2>PR2_atual) && (PR2<=PR2_f))
        {PR2_atual = PR2;}
        else
        {PR2_atual = PR2_atual;}

        setup_timer_2(T2_DIV_BY_16,PR2_atual,1);          //
        setup_timer_2(T2_DIV_BY_TMR2,PR2,1);
        duty_Vsold = PR2_atual/2;
        set_pwm2_duty(duty_Vsold);
        printf("%u \n\r", PR2_atual);

    }

    void main()
    {
        inicia_pic();          // chama a função que apenas roda seu código sem retornar
        nenhum valor;
        tela_inicializacao ();          // Chama a função que imprime a tela de inicialização no
        LCD;

        while(TRUE)
        {

```

```

while (!input(PIN_A2)) //SELEÇÃO DO MODO DE VISUALIZAÇÃO DE
PARÂMETROS// ENQUANTO ESTIVER APERTANDO O BOTÃO A2 (JUMPEANDO GND).
{ tela_parametros (); }

if (input(PIN_A2)) //SELEÇÃO DO MODO AUTOMÁTICO (VARIAÇÃO DOS
PARAMETROS EM FUNÇÃO DE TETHA)
{
    tela_pos_inicial ();
    tetha_atual=0;

    while(!input(PIN_A1)) // SE ESTE PINO ESTIVER HABILITADO O PROGRAMA
    FICARÁ AGUARDANDO O DISPARO! Esse pino habilita o disparo!
    {

        tela_disparo ();
        set_pwm2_duty{1104, #4};
        PR2_atual=0;
        tetha_atual=0;

        while(!input(PIN_A3)) // ESSE PINO DISPARA O PROGRAMA!
        {
            while ( (tetha_atual >= S0) && (tetha_atual <= S1) ) // para a faixa de S0 à S1
            (plana)
            {
                angulo_crescente ();
                parametros_fixos (Vs_p, J);
                if(input(PIN_A3))
                {break;}
            }

            while ( (tetha_atual > S1) && (tetha_atual <= S2) ) // para a faixa de S1 à S2
            (transição plana-vertical)
            {
                angulo_crescente ();
                parametros_variaveis (Vs_p, Vs_v, S1, S2, J);
                if(input(PIN_A3))
                {break;}
            }

            while ( (tetha_atual > S2) && (tetha_atual <= S3) ) // para a faixa de S2 à S3
            (vertical)
            {
                angulo_crescente ();
                parametros_fixos (Vs_v, J);
                if(input(PIN_A3))
                {break;}
            }

            contador = 0;

            while ( (tetha_atual > S3) && (tetha_atual <= S4) ) // para a faixa de S3 à S4
            (transição vertical-sobrecabeça)
            {
                angulo_crescente ();
                parametros_variaveis (Vs_v, Vs_s, S3, S4, J);
                if(input(PIN_A3))
                {break;}
            }
        }
    }
}

```

```

(sobrecabeça)      while (tetha_atual > S4)                // para a faixa de S4 à S5
                    {
                      angulo_crescente ();
                      parametros_fixos (Vs_s, J);
                      if(input(PIN_A3))
                      {break;}
                      }
                    }
                  }
                }
              }
            }
          }
        }
      }
    }
  }
}

```

### 13. APÊNDICE IV: PROGRAMA INSERIDO NO PIC3

```

#include <16F877A.h>
#define adc=10
#define fuses XT, NOWDT, NOPROTECT, BROWNOUT, PUT, NOLVP
#define use delay(clock=20000000)
#define use rs232(baud=38400,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8)

// COLOQUE ESTA LINHA EM TODOS OS PROGRAMAS ANTES DO MAIN
//////////
////////// PARA GRAVAÇÃO ATAVÉS DO BOOT_RS232 //////////

#define org 0x1F00, 0x1FFF void loader16F877A(void) { }

//////////

int16 isr_ccp_delta; //Esta variável global armazena o intervalo de tempo entre duas consecutivas
subidas de borda do sinal de entrada;
int16 current_ccp_delta;
int16 frequency;
float Valim, Valim_medio, Valim_acumulado;
int i=0;

void inicia_pic(void)
{
    setup_adc_ports(NO_ANALOGS);
    setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_4);
    setup_psp(PSP_DISABLED);
    setup_spi(SPI_SS_DISABLED);

    // Limpa o valor alocado para o CCP1 antes de habilitar a interrupção para se evitar de ter uma
    interrupção logo que seja habilita;
    clear_interrupt(INT CCP1);
    enable_interrupts(INT CCP1);
    enable_interrupts(GLOBAL);

    //configura o timer1 e CCP1 para o modo de captura, para que se possa medir a frequência do
    sinal de entrada.
    set_timer1{1104, #4};
    setup_timer_1(T1_INTERNAL | T1_DIV_BY_1);
    setup_ccp1(CCP_CAPTURE_RE);
    setup_ccp2(CCP_PWM);
    setup_comparator(NC_NC_NC_NC);
    setup_vref(FALSE);
}

#define int_ccp1 //função da interrupção timer1 (CAPTURE)
void ccp1_isr(void)
{
    // Quando uma subida de borda é detectada no sinal de entrada, o CCP1 irá capturar o valor do
    timer 1 neste //instante Em seguida, a interrupção CCP1 é gerada e a função isr é chamada. Nesta função,
    o valor do //Timer1 é capturado. Assim, este valor capturado é subtraído do valor anteriormente

```

capturado. O resultado //é o intervalo de tempo entre duas bordas de subida do sinal. Este intervalo de tempo e convertido em //frequência por um código na função principal (main).

```

int16 current_ccp;
static int16 old_ccp = 0;

current_ccp = CCP_1; // leitura do registro CCP1

//Calcula o intervalo de tempo entre a borda de subida anterior e a atual e em seguida coloca este
valor em uma variável global que pode ser lida pela função principal.

isr_ccp_delta = current_ccp - old_ccp;

// Salva o valor de current ccp para a próxima passada por esta função.
old_ccp = current_ccp;
}

void main()
{
    inicia_pic(); // chama a função que apenas roda seu código sem retornar
nenhum valor;
    printf("AGUARDANDO DISPARO..");

    while(TRUE)
    {
        while(!input(PIN_A3)) // ESSE PINO DISPARA O PROGRAMA!
        {
            disable_interrupts(GLOBAL);
            current_ccp_delta = isr_ccp_delta;
            enable_interrupts(GLOBAL);

            if(i<250) // A cada 250 valores será feita uma média.
            {
                i++;
                //neste ponto calcula-se a frequência. O número 5000000 vem do inverso de um ciclo de
                máquina que é 4/frequencia de oscilação
                frequency = (int16)(5000000 / current_ccp_delta);
                Valim = 0.0076*frequency-0.0766; // curva de calibração tirada do
                excell!!!!!!
                Valim_acumulado = Valim + Valim_acumulado; //acumula o valor de Valim das 10
                amostras na variavel Valim_acumulada
            }

            if(i==250) // Quando i=250 é porque já se leu 250 valores
            {
                Valim_medio = Valim_acumulado/250.0; // obtém-se o valor de Valim média a
                cada 250 valores lidos
                i=0; // zera o valor de i para somente entrar aqui denovo
                quando já leu 10 valores
                Valim_acumulado = 0; // limpa o valor da variável Valim_acumulada
                para que possa ser novamente usada
                printf("%.2f\n\r", Valim_medio);
            }
        }
    }
}

```

# **14. APÊNDICE V: LISTAGEM DOS COMPONENTES ELETRÔNICOS UTILIZADOS**

32 Resistores		
<u>Quantidade:</u>	<u>Referência</u>	<u>Valor</u>
2	R1, R2	22k
2	R3, R4	2.7k
4	R5, R6, R9, R11	10k
7	R7, R17, R19, R22, R24, R25, R27	470
3	R8, R18, R20	1k
1	R10	250
3	R12, R13, R16	120
1	R14	680
1	R15	39
4	R21, R23, R26, R28	4k7
1	R29	270
3	R30-R32	1,5k
21 Capacitores		
<u>Quantidade:</u>	<u>Referência</u>	<u>Valor</u>
6	C1, C2, C5, C6, C22, C23	22pF
2	C3, C4	0.1uf
3	C7, C14, C15	100nF
8	C8-C11, C18-C21	1uf
1	C12	1uF
1	C13	0,1uF
19 Circuitos integrados		
<u>Quantidade:</u>	<u>Referência</u>	<u>Valor</u>
3	U1, U15, U17	PIC16F877A
1	U2	741
2	U3, U18	MAX232
2	U4, U5	LM317T
1	U6	74HC86
1	U7	7474
3	U8, U9, U16	4N25
1	U10	ISO122
4	U11-U14	6N136
1	U19	74132
3 Diodos		
<u>Quantidade:</u>	<u>Referência</u>	<u>Valor</u>
3	D1-D3	LED-red 2,5mm
30 Variados		
<u>Quantidade:</u>	<u>Referência</u>	<u>Valor</u>
5	+15V, CABO 3V TO ENCODER, CONECTOR INCLINOMETRO, ENCODER, FONTE 15V EXT	Conector 3 vias
2	CABO 8V TO MILLER, CONECTOR 8V TO V4	Conector 8 vias

3	CHAVE COMUTADORA SERIAL, SAIDA MILLER, SERIAL OUT	Conector 6 vias
10	CONECTOR GATILHO, CONECTOR VSOLD, ENTRADA INCLIN., FONTE 5V EXT, GATILHO, HAB., JUMPER, M/A, RESET, VSOLD	Conector 2 vias
2	LCD1, LCD2	Display LCD
2	LCD_1, LCD_2	Conector 14 pinos
1	RL1	Relê 5 Vdc
1	RV1	Potenciômetro 1k
1	USB_IN	Conector USB femea
3	X1-X3	CRYSTAL