

**LUCAS ALVES DO NASCIMENTO**

**AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS GMAW COM  
TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO  
CONVENCIONAL E CONTROLADO (STT)  
APLICADOS NA SOLDAGEM CIRCUNFERENCIAL  
MECANIZADA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
2015

**LUCAS ALVES DO NASCIMENTO**

**AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS GMAW COM TRANSFERÊNCIA  
POR CURTO-CIRCUITO CONVENCIONAL E CONTROLADO (STT)  
APLICADOS NA SOLDAGEM CIRCUNFERENCIAL MECANIZADA**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

**UBERLÂNDIA - MG  
2015**

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

---

- N244a  
2015 Nascimento, Lucas Alves do, 1985-  
Avaliação dos processos GMAW com transferência por curto-circuito convencional e controlado (STT) aplicados na soldagem circunferencial mecanizada / Lucas Alves do Nascimento. - 2015.  
313 f. : il.
- Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
Inclui bibliografia.
1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem - Teses. I. Vilarinho, Louriel Oliveira, 1975- II. Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

---

CDU: 621

*Dedico,*  
*Aos meus pais, José Carlos e Elizabeth.*  
*Ao meu irmão, Tiago.*



“A mente que se abre a uma nova idéia  
jamais voltará ao seu tamanho original.”

***ALBERT EINSTEIN***

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Louriel Vilarinho, pela receptividade, confiança, oportunidade, orientação, amizade e incentivo, que foram essenciais para a conclusão deste trabalho;

Aos meus pais José Carlos do Nascimento e Elizabeth Alves do Nascimento e ao meu irmão Tiago Alves do Nascimento pelo estímulo, apoio, suporte, carinho, compreensão e motivação em alcançar vitórias;

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

À PETROBRAS pelo suporte financeiro;

À CAPES/PROEX e ao CNPq pelo suporte financeiro;

Ao Laprosolda/UFU pelo apoio técnico, financeiro e laboratorial;

Aos Prof(s). Américo Scotti, Valtair Ferraresi, Ruham Pablo Reis e Roberto Finzi pelos ensinamentos na área;

Aos Engenheiro(a)s Dr. Marcus Vinícius Ribeiro Machado, MSc. Victor Augusto Nascimento Magalhães, MSc. Carolina Pimenta Mota, MSc. IWE Diandro Fernandes, Dr. Thonson Costa Ferreira, Luiz Carlos de Menezes Júnior pelo apoio direto na realização deste trabalho;

A “técnica” de laboratório Ângela Maria da Silva Andrade;

Ao técnico da oficina/FEMEC, Lazinho;

As pessoas próximas, em especial, ao Prof. MSc. Eng. Armando Marques, Eng. Alexandre Lúcio Gontijo da Silva, Prof. MSc. Cleudes Guimarães, Denise Ferreira da Silva, Edmundo Benedetti Filho, Fernando Alves de Oliveira, Fernando Sousa dos Santos (Paraíba), Eng. Germano Alves da Costa, Paulo Henrique dos Santos, Eng. Rafael Alves Magalhães, Rodrigo Augusto Menezes Rios, Prof. MSc. Eng. Thiago Resende Larquer, Eng. Vanessa Souza Vieira, Eng. Thiago de Souza Amaral e Eng. Wanderson Henrique Maciel Martins.

NASCIMENTO, L. A. **Avaliação dos Processos GMAW com Transferência por Curto-Circuito Convencional e Controlado (STT) Aplicados na Soldagem Circunferencial Mecanizada**. 2015. 313 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

## RESUMO

*A grande extensão territorial brasileira e as constantes previsões de crescimento na demanda pelo consumo de petróleo e gás criaram um grande desafio nacional para a expansão rápida e confiável de gasodutos. A necessidade de construção e recuperação de novos dutos exigem processos de soldagem de alta produtividade, confiáveis e que produzam cordões de solda de qualidade, em detrimento do processo eletrodo revestido, atualmente o mais utilizado na união de dutos. Portanto, este trabalho apresenta o estudo da soldagem relacionada à união de dutos por soldagem circunferencial em meia cana de dutos em aço carbono (API 5L, 2012) de 8" de diâmetro nominal e 8,0 mm de espessura. As soldagens foram realizadas em progressão descendente por meio de dispositivo de deslocamento orbital (soldagem mecanizada), utilizando-se arame ER70S-6 com 1,2 mm de diâmetro e protegido pela mistura de Ar+25%CO<sub>2</sub>. O material foi depositado em junta de topo com chanfro em V e bisel de 15°, 1 mm de altura de nariz, 3 mm de abertura de raiz e sem cobre-junta. Para a junta proposta foram avaliados os processos GMAW com transferência metálica por curto-circuito em modo convencional (natural) e o processo derivativo GMAW utilizando fonte comercial STT (Surface Tension Transfer). Neste contexto, foram investigados parâmetros de soldagem na junta soldada proposta em dois passes (um de raiz e outro de enchimento/acabamento). As análises dos cordões de soldas foram obtidas por meio da inspeção visual e ensaios mecânicos voltados para a sua qualificação (tração uniaxial, dobramento de face e raiz, nick-break, ensaio de impacto charpy, macrografia e perfil de dureza). Além da qualificação dos processos de soldagem, foram realizadas melhorias na bancada experimental, na montagem do duto de teste e no sistema eletrônico existente. Dentre estas melhorias, são citadas a otimização do sincronismo de disparo entre a fonte de soldagem, o sistema de aquisição e a máquina de soldagem orbital; a eliminação de desligamento do equipamento durante as execuções da soldagem; otimização do controle de ajuste automático da distância bico contato peça (DBCP) e a eliminação do estreitamento visual da região de aquecimento causado pelos elementos de fixação das juntas ("cachorros"). Foram realizados pré-testes para levantamento de parâmetros e para avaliar qualitativamente o decaimento de temperatura em ambos os lados das juntas soldadas motivada pela grande frequência de falta de fusão lateral observada em trabalhos anteriores. Os resultados mostram que a taxa de decaimento da temperatura em um dos lados do duto não afeta a soldagem em geral. Por fim, é possível concluir que apenas quando se utilizou o processo de soldagem derivativo investigado STT (GMAW curto-circuito controlado) foi possível obter um conjunto de parâmetros robusto para a junta proposta, em função dos critérios de aceitabilidade da Norma API 1104 (2010). Já para o processo convencional GMAW, foi possível obter um conjunto de parâmetros adequado somente para o passe de raiz.*

**Palavras-Chave:** Soldagem de dutos; Transferência Metálica Controlada; STT; Progressão descendente; Otimização Eletrônica.

NASCIMENTO, L. A. **Evaluation of GMAW Processes with Conventional and Controlled (STT) Short-circuit Transfer Applied to Mechanized Girth Welding**. 2015. 313 f. MSc. Thesis, Federal University of Uberlândia, MG, Brazil.

## ABSTRACT

*The large Brazilian territory and the increasing demand for oil and gas consumption created a national challenge for the fast and reliable expansion of pipelines. The need for construction and maintenance and of new pipelines require welding processes with high productivity, reliable, that produce quality welds, to the detriment of the coated electrode process, currently the most used in the pipe union. Therefore, this work presents the study of girth welding of carbon steel pipes (API 5L, 2012) with 8" nominal diameter and 8.0 mm thickness. The welds were carried out in downhill progression by using orbital displacement device (mechanized welding), ER70S-6 wire with 1.2 mm diameter and Ar+25%CO<sub>2</sub>, as shielding gas. The material was deposited on butt V joint with 15° bevel, 1 mm of root face and 3 mm root opening, without backing. For the proposed joint, GMAW processes with short-circuit metal transfer were assessed in both conventional and derivative modes by using commercial power source namely STT (Surface Tension Transfer). In this context, welding parameters were investigated for root pass and filling pass. The analysis were obtained from visual inspection and mechanical tests (uniaxial tensile test, root and face bending, nick-break, charpy V-notch impact test, macrography test and hardness profile) with objective to qualify both processes. In addition to the qualification of welding processes, it was also necessary to make improvements in the experimental rig, the test-pipe assembly and the existing electronic system. Among such improvements, it was carried optimization the trigger synchronism between the power source, the data acquisition system and the orbital machine; the elimination of equipment shutdown during welding; the optimization of automatic adjustment control of the contact tip to workpiece distance (DBCP) and the elimination of visual narrowing of the heat zone caused by fixtures. Pre-tests were carried to qualitatively evaluate the temperature decay on both sides of the welded joints motivated by the excessive frequency of defects (lack of side fusion) previously observed. The results showed that the temperature decay rate on one side of the pipeline does not affect the welding. Finally, only the derivative process (STT) was capable to obtain a robust set of parameters for the proposed joint, in accordance to the acceptability criteria of standard API 1104 (2010). On the other hand, the conventional process GMAW was capable only to obtain a set of parameters for the root pass.*

**Keywords:** Pipe Welding; Controlled Metal Transfer; STT; Downhill Progression; Electronics Optimization.

## Lista de Símbolos e Abreviaturas

$A_h$	Área entre a superfície superior da raiz e a superfície imediatamente abaixo do reforço
$A_s$	Área total da seção transversal do chanfro
$a_0, a_1, a_2$	Constantes do termo recursivo
API	<i>American Petroleum Institute</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
$b_0, b_1, b_2$	<i>Constantes do filtro digital</i>
C	Coefficiente de arraste aerodinâmico
CC	Corrente constante
CMT	<i>Metal cold transfer</i>
Cons	Consumo
$C_p$	Calor específico
CP	Corpo de prova
d	Diâmetro da gota
$d_g$	Densidade do gás
DBCP	Distância bico de contato peça
D1	Dimensão de um lado da impressão
F	Carga ou Força
fr	Frequência da rede
f	Frequência de oscilação da tocha
$F_a$	Força de arraste
$F_e$	Força eletromagnética
$F_g$	Força gravitacional
$F_y$	Força devido a tensão superficial
$F_v$	Força de vaporização
g	Aceleração da gravidade
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
h	Altura entre a superfície superior da raiz e a superfície do externa do duto
H	Dureza Vickers
H/L	<i>Hi/Low</i>
I	Corrente percorrida no arame
$I_b$	Corrente de base
IIR	<i>Digital Filters Design</i>

IIW	<i>International Institute of Welding</i>
$I_M$	Corrente média
$I_{m\acute{a}x}$	Corrente máxima
$I_p$	Corrente de pico
$I_s$	Corrente de soldagem
IVcc	Índice de Regularidade
K	Calor específico
Laprosolda	Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem
$L_{el}$	Comprimento energizado do arame-eletrodo
m	Massa
n	Ordem do filtro digital
$P_{fem}$	Pressão devido à força eletromagnética
PIC	Microcontrolador
r	Distância do ponto medido até o centro do condutor
R	Raio do condutor
$r_g$	Raio da gota
RMD	<i>Regulated Metal Deposition</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
S	Superfície de impressão (Dureza)
STT	<i>Surface Tension Transfer</i>
t	Espessura do corpo de prova
$t_{ab}$	Média do tempo de arco aberto
Tatm	Temperatura ambiente
TC	Temperatura dos componentes
$t_{cc}$	Média do tempo de curto-circuito
TCmed	Temperatura média final.
Tout	<i>Tail-out</i>
Tobj	Temperatura do objeto
Tref	Temperatura refletida
Ufonte	Sinal de saída da câmera termográfica
V	Vazão do fluxo de gás
$V_a$	Velocidade de alimentação
$V_s$	Velocidade de soldagem
Watm	Radiação do meio de propagação
Wobj	Emissão de radiação proveniente do objeto

$\omega_n$	Frequência de corte “cutoff frequency”
$W_{ref}$	Radiação refletida pela superfície do tubo teste
$W_{total}$	Radiação total recebida pela câmera
ZAC	Zona termicamente afetada pelo calor
$\alpha$ e $\beta$	Coefficientes das composições químicas do gás de proteção e do eletrodo (resistividade elétrica), da polaridade, e do diâmetro do eletrodo
$\alpha$	Difusividade
$\gamma$	Tensão superficial
$\varepsilon$	Emitância
$\varepsilon_{refl}$	Emitância refletida
$\tau$	Transmitância
$\mu$	Permeabilidade Magnética do meio
$\Delta T$	Valor a ser reduzido da temperatura originalmente proposta
$\Delta V$	Tensão de “ <i>ripple</i> ”
$\sigma_{tcc}$	Desvio padrão da média do tempo de curto-circuito
$\sigma_{tab}$	Desvio da média padrão do tempo de arco aberto
$\lambda$	Comprimento de onda do tecimento
$\rho$	Densidade

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	24
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
2.1 Processos de soldagem GMAW .....	28
2.1.1 Teoria do balanço das forças eletrostáticas no processo GMAW .....	29
2.2 Modos de transferência metálica .....	34
2.2.1 Transferência por curto-circuito convencional .....	38
2.2.2 Transferência por curto-circuito controlado (STT) .....	44
2.2.3 Índice de regularidade.....	49
2.3 Parametrização envolvendo dutos .....	50
2.3.1 Envelopes de trabalho .....	50
2.3.2 Dificuldades da soldagem fora de posição .....	54
2.3.3 Cálculo da frequência de oscilação da tocha.....	56
2.4 Considerações à norma API 1104 (2010) .....	57
2.4.1 Inspeção visual .....	58
2.4.2 Requisitos de qualificação para os ensaios destrutivos.....	60
METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	63
3.1 Bancada experimental .....	64
3.1.1 Fonte de soldagem para curto-circuito convencional.....	66
3.1.2 Fonte de soldagem para curto-circuito controlado (STT).....	67
3.1.3 Execução das soldagens .....	68
3.1.4 Planificação de imagens (registro da solda) .....	72
3.2 Materiais .....	74
3.2.1 Metal de base.....	74
3.2.2 Metal de adição .....	75
3.2.3 Gás de proteção.....	76
3.2.4 Sistema de aquisição de tensão e corrente .....	76
3.2.5 Manipulação do Tartilope V4 .....	79
3.2.6 Tocha .....	81
3.2.7 Definição, fabricação dos chanfros e montagem da junta .....	82
3.3 Ensaios destrutivos.....	86
3.3.1 Fabricação de corpos de prova e método de ensaios .....	88
DESENVOLVIMENTO E TESTES PRELIMINARES .....	99
4.1 Desenvolvimento preliminares.....	99
4.1.1 Sistema eletrônico de acionamento sincronizado .....	99
4.1.2 Sistema eletrônico de controle da DBCP .....	101
4.1.3 Elementos de fixação das juntas (“cachorros”).....	111
4.1.4 Eliminação de desligamento do Tartilope V4.....	113
4.2 Cálculo entre velocidade de soldagem e velocidade de alimentação .....	116
4.3 Testes preliminares de passe de raiz com parâmetros pré-qualificados.....	118
4.3.1 Processo de soldagem curto-circuito convencional .....	119
4.3.2 Processo de soldagem curto-circuito controlado (STT) .....	120
4.4 Avaliação qualitativa por termografia.....	124
4.4.1 Ajuste da câmera termográfica .....	127
4.4.2 Cordões de solda e dados adquiridos.....	129
4.4.3 Seleção dos pontos simétricos .....	132



4.4.4 Geração das matrizes .....	137
4.4.5 Técnica de geração dos gráficos - temperatura x tempo .....	137
4.4.6 Resultados .....	139
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	142
5.1 Definição das condições paramétricas .....	142
5.2 Processo GMAW curto-circuito convencional.....	144
5.2.1 Determinação dos parâmetros para o passe de raiz .....	144
5.2.2 Determinação dos parâmetros para o passe de enchimento .....	151
5.2.3 Critérios de aceitabilidade .....	158
5.2.4 Oscilogramas .....	162
5.3 Processo GMAW curto-circuito controlado (STT).....	166
5.3.1 Determinação dos parâmetros para o passe de raiz .....	166
5.3.2 Determinação dos parâmetros para o passe de enchimento .....	167
5.3.3 Critérios de aceitabilidade .....	181
5.3.4 Oscilogramas .....	196
CONCLUSÕES .....	200
TRABALHOS FUTUROS .....	204
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	207
APÊNDICE I .....	215
Programa: Controle Automático Distância Bico Contato Peça (DBCP) .....	215
APÊNDICE II .....	217
Micrografia Óptica: Pontos de Coleta dos Dados de Dureza (STT) .....	217
APÊNDICE III .....	241
Programa: Aquisição de Sinais de Corrente e Tensão com Sistema de Disparo Sincronizado com o Tartilope e a Fonte de Soldagem.....	241
Programa: Aquisição de Sinais de Corrente e Tensão com Sistema de Disparo Sincronizado com o Tartilope e a Fonte de Soldagem - Interface Amigável Homem Máquina .....	242
APÊNDICE IV .....	243
Ensaio Preliminares com Câmera Termográfica: Compilação da Imagem em Valores Numéricos (Código Completo em MATLAB®) .....	243
APÊNDICE V .....	252
Ensaio Preliminares com Câmera Termográfica: Dados Expurgados por meio da Análise de Gráficos .....	252
APÊNDICE VI .....	258
Ensaio Preliminares com Câmera Termográfica: Imagens dos Cordões de Solda .....	258
APÊNDICE VII .....	271
Procedimento de Planificação dos Cordões de Solda em Dutos (Pós Filmagem) .....	271
APÊNDICE VIII .....	286
Ensaio Preliminares com Câmera Termográfica: Gráficos .....	286
APÊNDICE IX .....	297

Oscilogramas: Soldas Seleccionadas para Análise Macrográfica .....	297
ANEXO I .....	312
Ambiente de Manipulação dos dados do Software Curto 3 (Matlab®).....	312

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Circuito de soldagem GMAW (ADAPTADO DE LINCOLN ELECTRIC, 2015a) .....	28
Figura 2. Efeito da Força Eletromagnética quando há (a) alta corrente e (b) baixa corrente .....	33
Figura 3. Mapa de transferência didática (ADAPTADO DE VILARINHO, 2007) .....	34
Figura 4. Modos naturais de transferência metálica por curto-circuito segundo classificação do IIW (ADAPTADO DE VILARINHO, 2007) .....	36
Figura 5. Oscilogramas representativo com valores típicos de tensão e corrente para o processo GMAW na transferência por curto-circuito em função do comportamento da gota (ADAPTADO DE PONOMAREV, 2012) .....	38
Figura 6. Controle interno da fonte (característica estática do arco) .....	41
Figura 7. Formatos reais de onda de tensão e corrente da tecnologia STT (ADAPTADO DE VILARINHO, 2014) .....	45
Figura 8. Oscilograma esquemático de controle da corrente para o processo STT (ADAPTADO DE LINCOLN ELECTRIC, 2005) .....	45
Figura 9. Influência da corrente de base na geometria do cordão (ADAPTADO DE LINCOLN ELECTRIC, 2005) .....	47
Figura 10. Influência da corrente de pico na geometria do cordão (ADAPTADO DE LINCOLN ELECTRIC, 2005) .....	48
Figura 11. Representação esquemática do parâmetro <i>Tail-out</i> (LINCOLN ELECTRIC, 2005) .....	49
Figura 12. Envelope operacional final para o processo GMAW convencional (MAGALHÃES, 2012) .....	51
Figura 13. Envelope operacional final para o processo GMAW derivativo STT (MAGALHÃES, 2012) .....	51
Figura 14. Condições paramétricas para o passe de raiz (SCOTTI ET AL, 2013; VILARINHO ET AL, 2013) .....	52
Figura 15. Envelope operacional dos processos GMAW convencional (MAG) e derivativo (CMT, RMD e STT) na progressão descendente (COSTA ET AL, 2012) .....	53
Figura 16. 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) (SCOTTI ET AL, 2013) .....	54
Figura 17. Macrografias dos cordões de solda (espessura da chapa: 8,0 mm) (SCOTTI, ET AL, 2013) .....	55
Figura 18. Esquema de oscilação da tocha representando a amplitude de tecimento e o comprimento de onda de tecimento .....	57
Figura 19. Representação dos defeitos (ADAPTADO DE API 1104, 2010) .....	60
Figura 20. Representação das imperfeições do ensaio nick-break (ADAPTADO DE API 1104, 2010) .....	61
Figura 21. Bancada experimental utilizada, sendo 1. Fonte de soldagem; 2. Cabo terra da fonte de soldagem (aterramento em ambos os lados do tubo); 3. Suporte do tubo teste (“castanha”); 4. Tocha de soldagem; 5. Carrinho de movimentação da tocha (Tartilope V4); 6. Cinta de suporte para movimentação angular do carrinho. 7. Sistema de controle de ajuste automático da DBCP; 8. Monitor de visualização dos	

parâmetros de movimentação da tocha; 9. Mesa posicionadora; 10. Controle manual de manipulação da tocha; 11. Tubo teste; 12. Sistema de controle do manipulador da tocha (Tartílope); 13. Arame ER70S-6 com 1,2 mm de diâmetro; 14. Sensor <i>laser</i> ; 15. Cilindro de gás; 16. Placa de aquisição (National Instruments modelo NI USB-6009); 17. Sistema de aquisição de dados .....	65
Figura 22. Fontes de soldagem utilizada: PipePro 450 RFC .....	66
Figura 23. Fontes de soldagem utilizada: Power Wave 450/STT .....	67
Figura 24. Esquema de execução das soldagens (progressão descendente na posição 5G) .....	69
Figura 25. Detalhes do posicionamento dos equipamentos para a filmagem dos cordões de solda produzidos .....	73
Figura 26. Imagem final do cordão de solda planejado (cordão de solda STT1) ....	73
Figura 27. Interface final do programa .....	77
Figura 28. Detalhe de instalação do transdutor para medição de corrente - sensor Hall .....	78
Figura 29. Sistema de aquisição de dados: (a) placa de aquisição modelo NI USB-6009; (b) condicionador de sinais .....	78
Figura 30. Gabinete de controle do Tartílope; (a) Detalhes do gabinete controle do Tartílope V4 (ADAPTADO DE UFSC, 2010); (b) Controle de correção manual do Tartílope V4 .....	79
Figura 31. Programa ambiente de parametrização do Tartílope V4: (a) Tela de programação de tecimento e outros parâmetros; (b) Tela para carregamento dos parâmetros programados em (a) (ADAPTADO DE UFSC, 2010) .....	80
Figura 32. Padronização dos eixos (ADAPTADO DE UFSC, 2010) .....	81
Figura 33. Detalhe dos prolongadores utilizados: (a) anterior (MAGALHÃES, 2012) e (b) modificado .....	82
Figura 34. Esquema de montagem do tubo teste (unidades em mm) .....	83
Figura 35. Detalhe do sistema de fixação dos tubos “cachorros” .....	83
Figura 36. Ponteamento por solda dos cachorros: (a) detalhes dos gabaritos utilizados; (b) detalhe do parafuso utilizado para ajuste da pressão da cinta e do tubo contendo o revestimento .....	85
Figura 37. Tubos testes montados .....	86
Figura 38. Posição de retirada dos corpos de prova (API 1104, 2010) .....	87
Figura 39. Extração de corpos de prova do duto soldado .....	87
Figura 40. Corpos de prova para exame macrográfico .....	88
Figura 41. (a) Máquina universal de ensaios instrumentada da marca Shimadzu, modelo Autograph AG-X; (b) Detalhe do corpo de prova posicionado para o ensaio de tração .....	89
Figura 42. (a) Dimensões aproximadas dos corpos de prova para ensaio de tração (ADAPTADO DE API 1104, 2010); (b) Exemplo de corpo de prova fabricado .....	89
Figura 43. (a) Detalhe do corpo de prova posicionado inicialmente para o ensaio de dobramento; (b) Detalhe do corpo de prova submetido a forças do cutelo; (c) Indicações do raio do êmbolo (A), da matriz (B) e largura da fieira (C) (Adaptado de API 1104, 2010) .....	90
Figura 44. (a) Dimensões aproximadas dos corpos de prova para ensaio de dobramento (Adaptado de API 1104, 2010); (b) Exemplo de corpo de prova fabricado .....	91
Figura 45. Etapas do Ensaio nick-break: (a) posicionamento do corpo de prova restringindo em um ponto; (b) impacto; (c) corpo de prova em deformação .....	92

Figura 46. Dimensões dos corpos de prova para ensaio nick-break segundo API 1104 (2010) .....	93
Figura 47. Exemplo de corpo de prova que não se rompeu utilizando-se configuração de 3 mm como entalhe lateral e de 1,6 mm no reforço .....	93
Figura 48. Detalhe dos corpos de prova fabricados para ensaio de nick-break (espessura da chapa: 8,0 mm).....	93
Figura 49. Máquina de impacto charpy Losenhauen e detalhes do posicionamento e entalhe da amostra.....	94
Figura 50. Detalhe dos corpos de prova para ensaio de impacto charpy .....	95
Figura 51. (a) Detalhe da ferramenta em aço rápido desenvolvida em laboratório para auxiliar na fabricação do entalhe no corpo de prova de charpy; (b) Detalhes do posicionamento da amostra e da ferramenta durante a fabricação do entalhe; (c) Amostra atacada com Nital 2% para identificação do limite da zona fundida.....	97
Figura 52. (a) Exemplo de impressão realizada em corpo de prova fabricado nesta pesquisa durante ensaio de dureza; (b) Representação dos parâmetros de impressão (ADAPTADO DE CALLISTER, 2008) .....	98
Figura 53. (a) Placa de aquisição modelo NI USB-6009; (b) Detalhamento dos terminais de entrada e saída do módulo (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).....	100
Figura 54. Diagrama de interligação do circuito eletrônico de sincronismo .....	101
Figura 55. Posicionamento do sensor <i>laser</i> para monitorar a DBCP (comprimento do duto: 223 mm) .....	102
Figura 56. Circuito de controle do ajuste automático da DBCP implementado .....	103
Figura 57. Equipamento de controle da DBCP sendo: 1. Circuito de controle PIC16F877A; 2. Driver de acionamento; 3. Fonte de tensão 18V; 4. Transformador 6 + 6 V; 5. Transformador 9 + 9 V; 6. Cabo de alimentação 220 Vca; 7. Chave liga/desliga de 250V/2A; 8. Cabos de interligação entre sensor led, CPU e botões de set e reset do controle manual; 9. Chave liga/desliga sensor led; 10. Chave liga/desliga PIC16F877A; 11. Cabo de interligação entre driver e CPU; 12. Cabo de alimentação do sensor <i>laser</i> ; 13. Cabo de interligação entre botões auxiliares e PIC16F877A; 14. Led indicador de alimentação do PIC16F877A; 15. Led indicador de acionamento de Z+ ou Z-; 16. Led indicador de controle da DBCP acionado ...	104
Figura 58. Detalhe de adaptação do controle manual .....	105
Figura 59. Interligação entre o driver do controle automático da DBCP e o controle manual (acionamento do motor Z+ e Z-).....	106
Figura 60. Esquema elétrico da fonte de alimentação 18Vcc .....	107
Figura 61. Esquema elétrico da fonte de alimentação 5 Vcc .....	108
Figura 62. Princípio de funcionamento de um filtro digital (ADAPTADO DE MPMENDES, 2009) .....	109
Figura 63. Detalhe do (a) sistema de fixação (“cachorros”) com cantoneiras 1/2x1/8” e (b) estreitamento da ZAC em função da presença deste sistema (SCOTTI ET AL, 2013) .....	112
Figura 64. Detalhe do sistema de fixação (“cachorros”) com cantoneiras 1”x3/16” e da área com alteração de coloração pelo efeito térmico em função desta modificação (passe de raiz).....	113
Figura 65. (a) Instalações bancada experimental anterior: a) Condicionador de sinais; b) Placa de aquisição; c) Sistema para acionamento conjunto; d) Monitor de controle do Tartilope; e) Monitor do sistema de aquisição; f) cabos de força e controle em um mesmo conduto; g) circuito de controle exposto (MAGALHÃES, 2012); (b) Corpo de prova com perfuração da raiz ocasionada pela parada repentina do Tartilope V4.	114

Figura 66. Disposição entre cabos de força e controle em novas instalações: (a) cabo de força de alimentação do carrinho; (b) cabo de alimentação do sensor <i>laser</i> ; (c) cinta guia e de suportação do carrinho de movimentação da tocha; (d) carrinho suporte de movimentação da tocha .....	115
Figura 67. Representação da geometria do chanfro utilizado (dimensões em mm).....	117
Figura 68. Ensaio com parâmetros sugeridos por Scotti et al. (2013) para o passe de raiz no processo convencional .....	120
Figura 69. Exemplo de perfuração inicial da raiz para dois testes preliminares (STT3 e STT7) utilizando-se o processo derivativo (STT) .....	121
Figura 70. Aspecto visual do cordão de solda para o passe de raiz executado entortando o arame em 3 mm para o Teste STT12 .....	123
Figura 71. Aspecto visual do cordão de solda para o passe de raiz (face superior) executado entortando o arame em 3 mm (Teste STT12) .....	124
Figura 72. Bancada experimental para filmagem termográfica da soldagem, sendo: 1. Interface de manipulação da câmera termográfica (laptop); 2. Câmera termográfica FLIR A325; 3. Tubo teste; B: Lado suportação e A: Lado do tubo.....	125
Figura 73. Representação esquemática de medições de temperatura por infravermelho. 1: Vizinhança; 2: Tubo teste/objeto; 3: Atmosfera; 4: Câmera. (ADAPTADO DE FLIR SYSTEM, 2010).....	127
Figura 74. Linha de interesse utilizada na imagem térmica .....	129
Figura 75. Oscilograma t�pico adquirido para o passe de raiz e enchimento utilizando o processo derivativo (STT) .....	130
Figura 76. Cordão de solda t�pico fabricado em testes com câmera termográfica .	131
Figura 77. Sincronismo entre filmagem e gráficos gerados no software Matlab�: (a) Imagem do filme em 3D no instante da passagem da tocha em frente a câmera; (b) gráfico representando a imagem mostrada em (a); (c) Imagem do filme em 3D no instante após a passagem da tocha na frente a câmera; (d) gráfico representando a imagem mostrada em (c) .....	133
Figura 78. Imagem justificando a expurga dos dados para a refletância provocada pelo acabamento superficial; (a) Ensaio 3T_E1; e (b) gráfico correspondente .....	134
Figura 79. Imagens térmicas e respectivos gráficos processados em Matlab�: (a) ensaio 3T_R1 e (b) seu gráfico correspondente; (c) ensaio 2T_R2 e (d) seu gráfico correspondente .....	134
Figura 80. Ambiente do software OrginPRO� para dados importados .....	138
Figura 81. Exemplos de gráficos (temperatura x tempo) em pontos simétricos para o passe de enchimento (processo derivativo - STT) – Ensaio 3T-E1 .....	139
Figura 82. Exemplos de gráficos (temperatura x tempo) em pontos simétricos para o passe de raiz (processo derivativo - STT) – Ensaio 3T-R1 .....	140
Figura 83. Aspecto da raiz do cordão de solda (lado interno ao duto) para o Teste 1 .....	146
Figura 84. Aspecto da raiz do cordão de solda (lado interno ao duto) para o Teste 2 .....	146
Figura 85. Aspecto da raiz do cordão de solda (lado interno ao duto) para o Teste 3 .....	147
Figura 86. Aspecto da raiz do cordão de solda (lado interno ao duto) para o Teste 4 .....	147
Figura 87. Aspecto da raiz do cordão de solda (lado interno ao duto) para o Teste 5 .....	148

Figura 88. Aspecto da raiz do cordão de solda (lado interno ao duto) para o Teste 6 .....	149
Figura 89. Aspecto da raiz do cordão de solda (lado interno ao duto) para o Teste 7 .....	149
Figura 90. Detalhes do passe de raiz interno executado com o processo convencional por curto-circuito (Teste 7) .....	151
Figura 91. Cordão de solda do Teste 2: passe de enchimento com $V_s = 25,0$ cm/min e $V_a = 4,0$ m/min com ângulo de inclinação da tocha em $0^\circ$ .....	153
Figura 92. Cordão de solda do Teste 3: passe de enchimento com $V_s = 22,7$ cm/min e $V_a = 4,0$ m/min com ângulo de inclinação da tocha em $0^\circ$ .....	154
Figura 93. Cordão de solda do Teste 5: passe de enchimento com $V_s = 23,9$ cm/min e $V_a = 3,8$ m/min com ângulo de inclinação da tocha em $0^\circ$ .....	154
Figura 94. Cordão de solda do Teste 6: passe de enchimento com $V_s = 21,9$ cm/min e $V_a = 3,8$ m/min com ângulo de inclinação da tocha em $0^\circ$ .....	155
Figura 95. Cordões de solda do Teste 8: passe de enchimento com $V_s = 18,8$ cm/min e $V_a = 3,8$ m/min com ângulo de inclinação da tocha em $0^\circ$ .....	156
Figura 96. Cordão de solda do Teste 10: passe de enchimento com $V_s = 21,0$ cm/min e $V_a = 3,5$ m/min com ângulo de inclinação da tocha em $0^\circ$ .....	157
Figura 97. Aspecto superficial do cordão de solda do Teste 13 para o passe de acabamento/enchimento executado com o processo convencional para o parâmetro selecionado: (a) posição plana (b) posição vertical (c) posição sobre cabeça .....	158
Figura 98. Macrografias dos cordões de solda para o processo convencional (espessura da chapa: 8,0 mm) .....	160
Figura 99. Oscilograma da posição plana em função do passe de raiz executado com o processo convencional (Teste 12) .....	163
Figura 100. Oscilograma da posição vertical em função do passe de raiz executado com o processo convencional (Teste 12) .....	163
Figura 101. Oscilograma da posição sobre cabeça em função do passe de raiz executado com o processo convencional (Teste 12) .....	164
Figura 102. Oscilograma da posição plana em função do passe de enchimento executado com o processo convencional (Teste 12) .....	164
Figura 103. Oscilograma da posição vertical em função do passe de enchimento executado com o processo convencional (Teste 12) .....	165
Figura 104. Oscilograma da posição sobre cabeça em função do passe de enchimento executado com o processo convencional (Teste 12) .....	165
Figura 105. Detalhes do passe de raiz interno ao tubo executado com o processo GMAW por curto-circuito derivativo (STT) .....	166
Figura 106. Detalhes do passe de raiz lado externo ao tubo executado com o processo GMAW por curto-circuito derivativo (STT) .....	167
Figura 107. Cordão de solda do Teste 1: passe de enchimento com $V_s = 23,5$ cm/min e $V_a = 4,5$ m/min ( $V_a/V_s = 19,1$ ) com ângulo de inclinação da tocha em $0^\circ$ .....	170
Figura 108. Cordão de solda do Teste 2: passe de enchimento com $V_s = 28,2$ cm/min e $V_a = 4,5$ m/min ( $V_a/V_s = 16,0$ ) com ângulo de inclinação da tocha em $0^\circ$ .....	171
Figura 109. Cordão de solda do Teste 3: passe de enchimento com $V_s = 21,5$ cm/min e $V_a = 4,5$ m/min ( $V_a/V_s = 20,93$ ) com ângulo de inclinação da tocha em $0^\circ$ .....	171

Figura 110. Cordão de solda do Teste 4: passe de enchimento com $V_s = 28,2$ cm/min e $V_a = 4,2$ m/min ( $V_a/V_s = 14,9$ ) com ângulo de inclinação da tocha em $0^\circ$	173
Figura 111. Cordão de solda do Teste 5: passe de enchimento para $V_s = 28,2$ cm/min e $V_a = 4,3$ m/min ( $V_a/V_s = 15,2$ ) com ângulo de inclinação da tocha em $0^\circ$	173
Figura 112. Cordão de solda do Teste 6: passe de enchimento para $V_s = 21,5$ cm/min e $V_a = 4,3$ m/min ( $V_a/V_s = 20,00$ ) com ângulo de inclinação da tocha em $0^\circ$	174
Figura 113. Cordões de solda do Teste 7 e 8: passe de enchimento para $V_s = 28,2$ cm/min e $V_a = 4,4$ m/min ( $V_a/V_s = 15,60$ ) com ângulo de inclinação da tocha em $0^\circ$	175
Figura 114. Cordão de solda do Teste 9: passe de enchimento para $V_s = 27,0$ cm/min e $V_a = 4,4$ m/min ( $V_a/V_s = 16,30$ ) com ângulo de inclinação da tocha em $0^\circ$	175
Figura 115. Cordão de solda do Teste 10: passe de enchimento para $V_s = 22,7$ cm/min e $V_a = 4,4$ m/min ( $V_a/V_s = 19,38$ ) com ângulo de inclinação da tocha em $0^\circ$	175
Figura 116. Cordão de solda do Teste 11: passe de enchimento para $V_s = 22,3$ cm/min e $V_a = 4,4$ m/min ( $V_a/V_s = 19,73$ ) com ângulo de inclinação da tocha em $0^\circ$	177
Figura 117. Cordão de solda do Teste 12: passe de enchimento para $V_s = 22,3$ cm/min e $V_a = 4,4$ m/min ( $V_a/V_s = 19,73$ ) sem defeitos com ângulo de inclinação da tocha em $0^\circ$	177
Figura 118. Cordões de solda dos Teste 16 e 17: passe de enchimento para $V_s = 22,3$ cm/min e $V_a = 4,4$ m/min ( $V_a/V_s = 19,73$ ) com ângulo de inclinação da tocha em $15^\circ$ (puxando)	178
Figura 119. Aspecto superficial do cordão de solda para o passe de acabamento/enchimento com ângulo de ataque da tocha $0^\circ$ para o Teste 13: (a) após limpeza; (b) antes da limpeza	180
Figura 120. Aspecto superficial do cordão de solda para o passe de acabamento/enchimento executado com o processo derivativo (STT) com ângulo de ataque da tocha $15^\circ$ para o Teste 17: (a) posição plana (b) posição vertical (c) posição sobrecabeça	180
Figura 121. Macrografias dos cordões de solda para o processo STT com ângulo de inclinação da tocha em $0^\circ$ (espessura da chapa: 8,0 mm)	182
Figura 122. Macrografia do cordão de solda para a posição plana do Teste 17: processo derivativo (STT) e ângulo de inclinação da tocha em $15^\circ$ (espessura da chapa: 8,0 mm)	183
Figura 123. Macrografia do cordão de solda para a posição vertical do Teste 17: processo derivativo (STT) e ângulo de inclinação da tocha em $15^\circ$ (espessura da chapa: 8,0 mm)	183
Figura 124. Macrografia do cordão de solda para a posição sobrecabeça do Teste 17: processo derivativo (STT) e ângulo de inclinação em $15^\circ$ (espessura da chapa: 8,0 mm)	183
Figura 125. Curvas tensão-deformação para os ensaios de tração uniaxial: (a) metal soldado (Teste 17); (b) metal de base	187
Figura 126. Aspectos visuais do corpo de prova do quadrante superior e fratura (Teste 17)	188



Figura 127. Aspectos visuais do corpo de prova do quadrante inferior e fratura (Teste 16) .....	188
Figura 128. Corpo de prova do quadrante superior após ensaios de dobramento (Teste 16). (a) Dobramento de face; (b) Dobramento de raiz .....	189
Figura 129. Corpo de prova do quadrante inferior após ensaios de dobramento (Teste 17). (a) Dobramento de face; (b) Dobramento de raiz .....	189
Figura 130. (a) Corpo de prova quadrante superior após ensaio de Nick-Break (teste 17); (b) Detalhe da área de ruptura .....	190
Figura 131. (a) Corpo de prova quadrante inferior após ensaio de Nick-Break (teste 16); (b) Detalhe da área de ruptura .....	191
Figura 132. Energia absorvida em função do quadrante superior (SUP) e inferior (INF) - (corpo de prova - Teste 17) .....	192
Figura 133. Detalhe das fraturas dos corpos de prova do ensaio charpy (espessura: 6,4 mm; largura: 10 mm; comprimento: 55 mm) para o Teste 17 .....	193
Figura 134. Valores de dureza obtidos para o passe de raiz (a) e passe de enchimento (b) do cordão de solda do Teste 17 .....	194
Figura 135. Oscilograma da posição plana em função do passe de raiz executado com o processo derivativo STT (teste 17) .....	196
Figura 136. Oscilograma da posição vertical em função do passe de raiz executado com o processo derivativo STT (teste 17) .....	197
Figura 137. Oscilograma da posição sobrecabeça em função do passe de raiz executado com o processo derivativo STT (teste 17) .....	197
Figura 138. Oscilograma da posição plana em função do passe de enchimento executado com o processo derivativo STT (teste 17) .....	198
Figura 139. Oscilograma da posição vertical em função do passe de enchimento executado com o processo derivativo STT (teste 17) .....	198
Figura 140. Oscilograma da posição sobrecabeça em função do passe de enchimento executado com o processo derivativo STT (teste 17) .....	199

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros de soldagem para o passe de raiz.....	52
Tabela 2. Parâmetros ajustados para o passe de enchimento/acabamento .....	52
Tabela 3. Critérios de aceitabilidade da API 1104 (2010) para duto de 8" de diâmetro .....	59
Tabela 4. Checklist de preparação inicial para a execução da soldagem .....	70
Tabela 5. Checklist pós soldagem .....	71
Tabela 6. Checklist para a execução do passe de enchimento .....	72
Tabela 7. Requisitos químicos para o aço API 5L X65 (API 5L, 2012) .....	74
Tabela 8. Composição química do metal de base recebido e utilizado .....	75
Tabela 9. Composição química nominal do arame AWS ER70S-6 (BELGO, 2013) .....	75
Tabela 10. Propriedades Mecânicas do arame AWS ER70S-6 (BELGO, 2013) .....	76
Tabela 11. Ensaios mecânicos executados e suas respectivas quantidades e localizações .....	86
Tabela 12. Valores finais para determinação da temperatura final da solução .....	96
Tabela 13. Dados de manual do sensor <i>laser</i> .....	102
Tabela 14. Valores retornados pelo Software Matlab® para a função da Eq. 3 .....	110
Tabela 15. Parâmetros de soldagem para o passe de raiz no processo convencional .....	119
Tabela 16. Parâmetros de soldagem definidos por Scotti et al. (2013) para o passe de raiz no processo derivativo (STT) .....	120
Tabela 17. Parâmetros monitorados para os passes de raiz no processo derivativo (STT) .....	121
Tabela 18. Parâmetros do processo derivativo (STT) para ensaios de termografia .....	126
Tabela 19. Parametrização da câmera termográfica .....	128
Tabela 20. Coordenadas em pixels das linhas de referência utilizada no ensaio termográfico .....	129
Tabela 21. Valores típicos de corrente e tensão adquiridos durante a avaliação termográfica .....	130
Tabela 22. Faixa de pontos expurgados por consequência de anomalias .....	135
Tabela 23. Pontos selecionados para análise do decaimento ou crescimento da temperatura .....	136
Tabela 24. Dados de gravação .....	138
Tabela 25. Parâmetros utilizados e medidos para determinação do parâmetro de raiz no curto-circuito convencional .....	144
Tabela 26. Resumo das características encontradas para o processo GMAW convencional .....	150
Tabela 27. Parâmetros finais do passe de raiz para o processo convencional .....	151
Tabela 28. Parâmetros utilizados nos passes de enchimento do processo convencional .....	152
Tabela 29. Parâmetros finais do processo derivativo (STT) para o passe de raiz..	166
Tabela 30. Parâmetros utilizados nos passes de enchimento do processo derivativo (STT) .....	168
Tabela 31. Valores da altura "h" dos passes de raiz que suportam os passes de enchimento/acabamento (Tabela 30) para o processo derivativo (STT) .....	170
Tabela 32. Dimensões das faces dos cordões de solda dos Testes 1, 2 e 3 .....	172

Tabela 33. Resumo de escorrimientos relacionado aos testes de enchimento com processo derivativo (STT) .....	176
Tabela 34. Dimensões dos corpos de prova fabricados para ensaio de tração uniaxial .....	186
Tabela 35. Resultados dos ensaios de tração uniaxial .....	186
Tabela 36. Requisitos mínimos do teste de tração (ADAPTADO DA NORMA API SPEC 5L, 2012) .....	187
Tabela 37. Dimensões dos corpos de prova fabricados para ensaio de dobramento .....	189
Tabela 38. Resultados do ensaio de impacto charpy (corpo de prova - Teste 17). .....	191

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

A soldagem de dutos e tubulações tornou-se mais importante no mundo da pesquisa científica, devido às exigências industriais de um mercado crescente na construção e união de quilômetros de tubulações para o transporte de fluidos, que atendem as necessidades do mundo moderno (MENESES, 2013). Os dutos hoje representam um sistema de transporte indispensável à economia mundial e são quarenta vezes mais seguros que o transporte de carga ferroviária e 100 vezes mais seguros que o transporte por caminhão. No Brasil a rede de dutos ainda é diminuta e a capacidade de uso das ferrovias e rodovias brasileiras está no limite (EDWARD, 2007).

No setor de mineração, os minerodutos são escolhidos, para ser o modal logístico de transporte do minério de ferro, por ser de alta confiabilidade, provocar baixos impactos ambientais e ter baixo custo operacional e de manutenção, especialmente se comparado com alternativas, como a ferroviária (AMADEI, 2014).

Assim, nesse setor de mineração, a expansão na construção de dutos, como por exemplo, o mineroduto “Sistema Minas-Rio”, enfatiza a importância da soldagem na construção de dutos. O empreendimento, que interliga os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, é o maior do mundo em extensão com 529 km e é uma das maiores obras de engenharia da América Latina. Grande parte da obra de implantação da tubulação antes de revestir as juntas e enterrar o mineroduto foi a união dos mesmos, sendo no total 43.774 soldas realizadas. O Diretor de Projetos da unidade ressalta que foi um trabalho extremamente importante e que passou por vários testes de controle de qualidade. Além disso, todos os soldadores possuíam certificação e seus resultados de desempenho eram monitorados (ABM, 2014).

Já no setor de óleo e gás, a malha dutoviária brasileira é pequena em relação ao tamanho de seu potencial de produção e distribuição de óleo, gás e biocombustíveis. A sua rede não chega a 7.200 km de oleodutos e 7.330 km de gasodutos, segundo os dados oficiais da Transpetro (PETRONOTÍCIAS, 2013). A produção total de petróleo e gás natural no Brasil no mês de novembro/2014 alcançou aproximadamente de 2,935 milhões de barris de óleo equivalente por dia, sendo 2,358 milhões de barris diários de petróleo e 91,7 milhões de metros cúbicos de gás natural. Houve aumento de em torno de 13,3% na

produção de petróleo se comparada com o mesmo mês em 2013. A produção de gás natural aumentou em torno de 16,0% frente ao mesmo mês em 2013 (ANP, 2015).

Para Sousa (2005), os dutos detêm, na indústria do petróleo, um alto padrão tecnológico e, portanto, impõe à mercadoria rapidez e segurança. Além do mais, para a obtenção de uma maior rapidez e menores custos na mobilidade da mercadoria, a indústria do petróleo se vale da tecnologia para expandir seu capital. O território dos dutos se faz presente no momento em que as possibilidades tecnológicas rompem as barreiras territoriais.

Assim, cita-se como exemplo de rompimento de barreiras territoriais (além do “Sistema Minas-Rio” mencionado no setor de mineração), a construção da Refinaria do Nordeste (RNEST) ou Refinaria Abreu e Lima, que está localizada em Ipojuca, na região metropolitana do Recife, que terá capacidade total de processamento de 230 mil barris por dia de diesel (PETROBRAS, 2015). Toda esta produção permitirá atender à crescente demanda por derivados na região do Nordeste e o excedente poderá abastecer ainda o restante do mercado nacional.

Destaca-se que os desafios em relação a dutos não são somente em terra. A necessidade da logística para movimentação de derivados de petróleo a partir do leilão do Campo de Libra, assim como a expansão da produção do pré-sal, vai demandar investimentos significativos nos próximos anos (PETRONOTÍCIAS, 2013). O Campo de Libra, localizado na Bacia de Campos, irá demandar de 12 a 18 plataformas, cujo potencial de óleo recuperável pode se aproximar dos 12 bilhões de barris (OTEMPO, 2013).

Dessa forma, os números e fatos apresentados demonstram a necessidade e importância da expansão rápida e confiável da malha dutoviária para escoamento de diversos produtos. Entretanto, na contramão dessa necessidade, o principal processo de soldagem utilizado na instalação de dutos e tubulações no Brasil é a soldagem manual com eletrodo revestido (MENESES, 2013), que possui baixa densidade de corrente e apresenta menor produtividade frente ao processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), por exemplo. Assim, Acuña et al. (2013) destacam que tal necessidade demanda o desenvolvimento contínuo de tecnologias de união por processos de soldagem mais produtivos.

Nesse contexto, o processo GMAW passa a ser visto com opção real em função da sua versatilidade e produtividade (ACUÑA ET AL, 2013), sendo que novas fontes e técnicas de controle avançadas têm sido desenvolvidas visando melhorar a transferência metálica, proporcionar menor aporte térmico para a peça soldada e diminuir respingos e fumos (VARGAS, 2011).

Tais fontes controladas adotam a ideia de sinergia (autoregulação a partir de um conjunto de parâmetros pré-determinados) e ainda requerem o ajuste de parâmetros que

antes não existiam para o processo GMAW convencional. Assim, o conhecimento sobre a influência destes parâmetros na qualidade da união é importante. Além disso, é importante também estabelecer cientificamente as capacidades operacionais de cada processo realizado pelas fontes comerciais (ACUÑA ET AL, 2013). Entretanto, deve-se salientar que as bases científicas não devam ser estabelecidas com base na simples comparação entre fontes de energia comerciais, uma vez que essa comparação depende de outros fatores, como custo de equipamentos, instalação, prazo de entrega e produção, manutenção, logística, assistência técnica, dentre outros, que são individualmente dependentes do chão de fábrica.

Em consonância com a necessidade e importância descritas, historicamente as atividades desenvolvidas pelo grupo Laprosolda (Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem) têm sido direcionadas para o estudo e desenvolvimento da soldagem de dutos e tubulações. Um dos desafios desse grupo é a união de dutos API 5L X65, com diâmetro nominal de 8" e espessura de 8,0 mm, em progressão descendente e em dois passes (um de raiz e outro de enchimento/acabamento), sem o uso de cobrejunta. Em um estudo prévio (SCOTTI ET AL, 2013), se estabeleceu as bases para o uso de fontes fundamentadas na tecnologia CMT (*Cold Metal Transfer*) e RMD (*Regulated Metal Deposition*), restando o estudo e avaliação do processo GMAW no modo curto-circuito convencional e controlado com tecnologia (STT – *Surface Tension Transfer*). O estudo (SCOTTI ET AL, 2013) foi demandado por uma empresa parceira do Grupo Laprosolda e executado por pesquisadores (incluindo o autor desta dissertação).

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo avaliar a soldagem GMAW em dutos API 5L X65, utilizando-se a transferência por curto-circuito em duas vertentes: convencional e controlado, especificamente o processo derivativo com tecnologia STT. Portanto, para atingir o objetivo desta pesquisa, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar soldagens em dutos usando o processo GMAW com transferência metálica por curto-circuito convencional e controlado (STT), utilizando um único conjunto de parâmetros de soldagem para a união de juntas com bisel em 15 graus em tubos X65 de 8" de diâmetro, utilizando gás de proteção (Ar+25%CO<sub>2</sub>) para o passe de raiz e enchimento;
- Analisar os cordões de solda obtidos por meio de inspeção visual para detectar a presença de defeitos na superfície;
- Selecionar os melhores cordões, levando em consideração a etapa anterior e o módulo de corrente, para análise metalográfica (macrografia) nas seções transversais das três regiões distintas (posição plana, vertical e sobrecabeça) com base nos critérios de aceitabilidade da Norma API 1104 (2010);

- Realizar ensaios mecânicos de tração, dobramento de face, dobramento de raiz, charpy, dureza e ensaio nick-break nos cordões que não apresentaram defeitos na etapa anterior de forma a qualificar os passes de raiz e enchimento em conjunto;
- Desenvolver e aprimorar dispositivos eletrônicos a serem utilizados na bancada experimental de forma a eliminar problemas de desligamento durante a execução da soldagem, otimizar eletronicamente o controle de ajuste da DBCP, otimizar o sincronismo de disparo entre fonte de soldagem, sistema de aquisição e a máquina de soldagem orbital.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 Processos de soldagem GMAW

O processo de soldagem GMAW (também conhecido como MIG/MAG - *Metal Inert Gas/Metal Active Gas*) é definido como um processo de soldagem que utiliza um arco elétrico entre o arame-eletrodo de alimentação contínua e a poça de fusão. O processo utiliza uma proteção externa de gás sem a aplicação de pressão (AWS, 1991). A Figura 1 mostra o circuito de soldagem GMAW.

O processo de soldagem funciona com corrente contínua (CC), normalmente com o arame no polo positivo (polaridade reversa). São comumente empregadas correntes de soldagem de 50 A até 600 A e tensões de soldagem de 15 V até 32 V (FORTES, 2005). A polaridade direta (arame no polo negativo) e alternada são menos utilizadas demandando fonte e técnicas específicas.

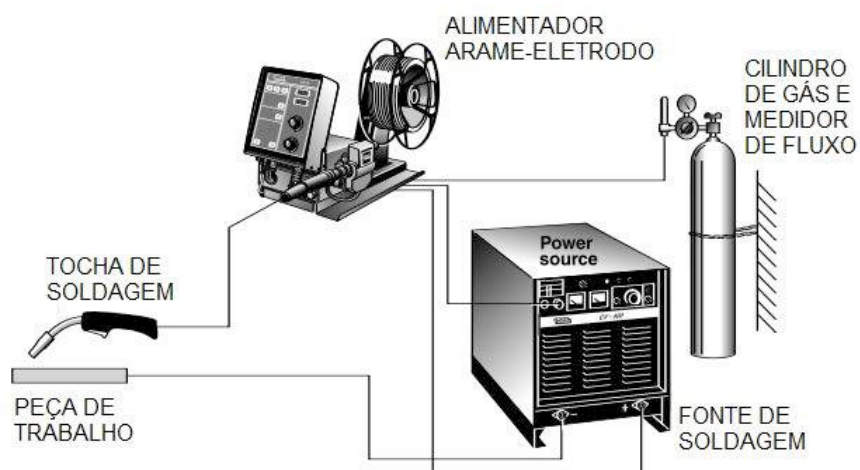


Figura 1. Circuito de soldagem GMAW (ADAPTADO DE LINCOLN ELECTRIC, 2015a)

O processo de soldagem GMAW pode ser operado de forma semiautomática ou mecanizada/robotizada/automatizada e soldar diferentes tipos de metais em qualquer posição de soldagem. A Norma API 1104 (2010) define a soldagem mecanizada como sendo um processo em que os parâmetros e a orientação da tocha são controlados



eletronicamente ou mecanicamente, mas podem ser variados manualmente durante a soldagem para manter as condições especificadas de soldagem. Já a soldagem semiautomática o equipamento controla apenas a alimentação do material e o avanço de soldagem é controlada manualmente. Na soldagem automática, o equipamento executa toda a operação de soldagem sem manipulação manual do arco e velocidade de soldagem, ou seja, sem qualquer interferência do operador, não dependendo da sua habilidade manual.

Com relação ao uso de uma proteção externa de gás, o fluxo adequado para praticamente todas as condições de soldagem é de 10 a 16 l/min. Valores acima deste são normalmente ineficientes (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

Já a condutividade térmica desse gás de proteção à temperatura do arco (plasma) influencia a tensão do arco, bem como a energia térmica transferida à poça. Quando maior a condutividade térmica do gás, maior será a tensão de soldagem necessária para sustentar o arco e maior será a energia térmica entregue. Por exemplo, a condutividade térmica do dióxido de carbono é maior que a do argônio, o que demanda maior tensão de arco e transfere mais energia à poça. Portanto, o dióxido de carbono necessita de uma tensão de soldagem maior para manter o arco estável (FORTES, 2005).

Além de gases de proteção puros, misturas também são comumente utilizadas. Adições de argônio ao dióxido de carbono diminuem os níveis de respingo normalmente experimentados com o dióxido de carbono puro. A mistura Argônio + 21-25% CO<sub>2</sub> (C25) é universalmente conhecida como o gás usado na soldagem GMAW com transferência por curto-circuito. Essa mistura funciona bem em aplicações de altas correntes em materiais espessos, e pode alcançar boa estabilidade do arco, controle da poça de fusão e aparência do cordão, bem como alta produtividade (FORTES, 2005).

### **2.1.1 Teoria do balanço das forças eletrostáticas no processo GMAW**

Segundo Modenesi (2007), as forças que influenciam no destacamento da gota são: Força gravitacional ( $F_g$ ); Força eletromagnética ( $F_e$ ); Força da tensão superficial ( $F_\gamma$ ); Força de arrasto dos gases ( $F_a$ ); e a Força de reação aos jatos de vapores ou ao jato de plasma ( $F_v$ ). É possível estabelecer um balanço estático destas principais forças, que podem atuar na ponta do eletrodo e contribuir para a transferência de metal, conforme mostrado pela Eq. 1.

$$F_g + F_a + F_e = F_y + F_v \quad (1)$$

Onde, “Fg” é a força gravitacional, “Fa” a força de arraste, “Fe” a força eletromagnética, “Fy” a força devido a tensão superficial e “Fv” a força de vaporização.

O destacamento da gota acontece quando as forças da gravidade, de arraste e eletromagnéticas são maiores que a força devido à tensão superficial mais a força de vaporização (MODENESI, 2007). Para soldagem fora de posição a força da gravidade contribui para o escoamento da poça de fusão. Caso haja o toque entre o arame-eletrodo e a poça, a principal força que atua na transferência é aquela devido à tensão superficial. Entretanto, a força eletromagnética também exerce um papel importante, auxiliando na separação entre a gota e o arame eletrodo, conforme será discutido no Item 2.2.1.

#### 2.1.1.1 Força gravitacional

É a força originada pela ação da gravidade e, por depender da massa, é governada pela dimensão e densidade do material da gota. Ao se assumir a gota com o formato esférico, a força gravitacional pode ser quantificada conforme a Eq. 2 (SCOTTI & PONOMAREV, 2008). Logo, esta força aumenta à medida que a massa e o diâmetro da gota aumentam. De acordo com Dutra & Quites (1979), para uma gota de aço de 1 mm de raio, a força gravitacional é de 32 dines (320 µN).

Dependendo da posição de soldagem, esta força pode favorecer ou dificultar a transferência de metal (MODENESI, 2007). A força gravitacional agindo na soldagem de dutos pode assumir diferentes funções dependendo da posição de soldagem, ou seja, pode auxiliar ou não o destacamento da gota. Para o ângulo de inclinação do eletrodo igual a 0° até o momento em que o eletrodo está a 90° com a superfície do duto a força da gravidade auxilia no destacamento da gota. A partir da posição vertical (90°) até a posição sobrecabeça (180°) a força da gravidade vai de encontro ao destacamento da gota, dificultando a transferência. Na soldagem fora de posição, a gota sempre tenderá a se desviar verticalmente para baixo, assim sendo, esta força favorece o escoamento.

$$F_g = \frac{\pi}{6} \cdot d^3 \cdot \rho \cdot g \quad (2)$$

Onde, “d” é o diâmetro da gota, “g” a aceleração da gravidade, “ρ” a densidade do metal de adição.

### 2.1.1.2 Força de reação de vaporização

Segundo Scotti & Ponomarev (2008), a força de reação é originada pela vaporização dos componentes do metal do arame-eletrodo na região do acoplamento do arco com a gota. Nesta região é originado muito calor, acarretando jatos de vapores metálicos, portanto correntes mais altas aumentam essas forças. Esses jatos exercem uma força de reação sobre a gota, tendendo a mantê-la mais tempo retida.

Correntes muito elevadas ou o uso de gases com baixa capacidade de troca de calor podem fazer com que o arco envolva toda a gota, o que dificulta a análise desta força sobre a gota.

### 2.1.1.3 Força de arraste

A força de arraste é originada pelo jato de plasma em contato com a gota. Uma espécie de vórtex é gerada após a passagem do plasma pela gota, fazendo com que ela seja sugada e arrastada pelo fluxo. Dessa forma, a força de arraste contribui sempre para o destacamento da gota (SCOTTI & PONOMAREV, 2008). A expressão para contabilizar esta força é dada pela Eq. 3. Por esta equação é possível afirmar que força de arraste tem maior importância quando a gota for de maior dimensão, ou seja, para correntes mais baixas (ROSADO, 2008).

$$F_a = \frac{\pi V^2 d_g r_g^2 C}{2} \quad (3)$$

Onde, “V” é a vazão do fluxo de gás, “dg” a densidade do gás, “rg” o raio da gota e “C” o coeficiente de arraste aerodinâmico.

### 2.1.1.4 Força devido à tensão superficial

Enquanto a gota de metal fundido permanece presa ao eletrodo, a tensão superficial age do sentido de mantê-la nesta condição (MODENESI, 2007). Segundo Scotti & Ponomarev (2008), no interior de um líquido, a força resultante em cada átomo é pequena ou nula, pois, são atraídas em todas as direções pelos átomos vizinhos. Mas, na superfície do líquido, a resultante de atração é para o interior do líquido, pois, a densidade molecular é maior dentro de um líquido que em um gás ou plasma (meio em que uma gota em soldagem

se desenvolve). A resultante destas forças cria uma tensão na superfície da gota e a mesma se comporta como uma película elástica. Por isto, a gota na ponta do eletrodo tende a tornar-se volumosa e se não houvesse outras forças a favor do destacamento da gota a mesma cresceria infinitamente. Portanto, a força devido à tensão superficial normalmente atua no sentido contrário ao destacamento da gota.

Por outro lado, quando ocorre o toque do arame-eletrodo na poça fundida, que é uma característica da transferência por curto-circuito (Item 2.2.1), a tensão superficial ajuda a promover a transferência de metal para a poça de fusão (MODENESI, 2007). O contato da gota com a poça metálica faz com que a força devido à tensão superficial puxe-a para dentro da poça (SCOTTI & PONOMAREV, 2008), já que a poça possui maior área superficial que a gota metálica.

A força devido à tensão superficial pode ser quantificada conforme a Eq. 4 (DUTRA & QUITES, 1979). De acordo com Dutra & Quites (1979), quando a corrente é baixa e não há contato entre a gota e a peça, a força gravitacional se opõe à tensão superficial, sendo elas as principais atuantes. Portanto, pode-se determinar a tensão superficial medindo a massa de uma gota, formada do eletrodo, à corrente baixa, caindo livremente igualando-se as Equações 4 e 2.

$$F_{\gamma} = \pi.d.\gamma \quad (4)$$

Onde, “d” é o diâmetro da gota e “ $\gamma$ ” a tensão superficial.

#### 2.1.1.5 Força eletromagnética

Segundo Mussoi (2007), um campo magnético pode ser criado por meio do movimento de cargas elétricas, tal como o fluxo de corrente num condutor. Ao campo magnético originado pelo movimento da corrente elétrica denomina-se de Campo Eletromagnético. A intensidade desse campo magnético gerado em torno de um condutor retilíneo percorrido por corrente elétrica é proporcional à intensidade dessa corrente.

Um condutor percorrido por corrente elétrica, imerso em um campo magnético, sofre a ação de uma força eletromagnética. Esta força age na direção perpendicular as linhas de força do campo magnético e pode ser dado pela regra da mão direita. Se o sentido da corrente for invertido, o campo magnético inverte, e a direção da força continua a mesma.

A gota fundida se comporta como uma infinidade de condutores flexíveis de correntes paralelas e de mesmo sentido (DUTRA & QUITES, 1979).

Em analogia a teoria de Mussoi (2007), Dutra & Quites (1979) e Scotti & Ponomarev (2008) para a gota que está se formando, essa força age no sentido de comprimi-la, uma vez que, a força tem ação radial e voltada para o interior da gota. Esta força eletromagnética pode ser quantificada conforme Eq. 5:

$$P_{fem} = \frac{\mu \cdot I^2}{4\pi^2 \cdot R^2} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (5)$$

Onde, “ $P_{fem}$ ” é a Pressão devido à força eletromagnética, “ $\mu$ ” a Permeabilidade Magnética do meio, “ $I$ ” a Corrente percorrida no arame, “ $R$ ” o Raio do condutor e “ $r$ ” a Distância do ponto medido até o centro do condutor.

A força favorece o destacamento da gota quando a corrente é alta, pois, há mais concentração de fluxo de corrente na parte de cima da gota. Quando a componente da força axial impulsiona a gota em progressão da poça de fusão, este efeito é denominado como Efeito Pinch (Figura 2a). Porém para baixa corrente, a maior concentração se dá na parte de baixo da gota, fazendo a força eletromagnética empurrar o volume de gota do arame (Figura 2b).

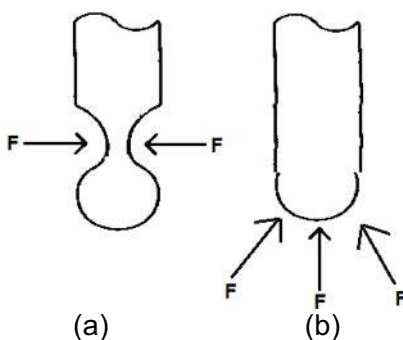


Figura 2. Efeito da Força Eletromagnética quando há (a) alta corrente e (b) baixa corrente

Segundo Scotti & Ponomarev (2008), para menores níveis de corrente (abaixo da corrente de transição discutida no Item 2.2), a transferência é determinada pelas forças descritas na teoria do balanço de estáticas (Eq. 1). Entretanto, para maiores valores de corrente (acima dessa corrente de transição), a transferência metálica torna-se mais dinâmica e a teoria de forças estáticas já não existe mais. Ou seja, acima de certo valor de corrente, ocorre a geração de mais calor, a ponta fundida do eletrodo se torna cilíndrica e não há mais formação progressiva de uma gota. O autor explica que quando isso ocorre a tensão superficial tende a reconstruir a superfície cilíndrica, ou seja, anular a constrição da gota (Efeito Pinch), procurando uma menor área por volume. Por outro, lado o Efeito Pinch

supera o efeito da tensão superficial, a coluna se rompe e uma pequena gota residual se forma. No caso, os efeitos das outras forças passam a ser desprezíveis.

## 2.2 Modos de transferência metálica

Um dos principais fatores que influencia a obtenção de uma solda de boa qualidade é a forma como o material é transferido desde o eletrodo (material de adição) até a poça de solda, ou seja, o modo da transferência metálica (VILARINHO, 2007).

Os modos de transferência metálica podem ser observados nos diferentes processos de soldagem, sendo associados a diversos fatores, tais como parâmetros elétricos (tensão, tipo e polaridade da corrente), materiais, gases, distância bico de contato peça (DBCP), características específicas da fonte de potência, etc. (VILARINHO, 2007).

Scotti & Ponomarev (2008) subdividem os modos em dois tipos fundamentais de transferência metálica no processo GMAW, o modo natural e o controlado. No modo de transferência natural, a transferência metálica varia “naturalmente” dentro de uma faixa de corrente e níveis de tensão de arco. Já na transferência controlada, a fonte de soldagem é utilizada para obter formatos de onda de corrente, de forma que a transferência “obedeça” a esta variação controlada dos parâmetros elétricos (VILARINHO, 2007).

O modo natural é classificado em duas classes de transferência, sendo por curto-circuito e por voo livre (globular, goticular e explosiva). De uma forma mais didática, é possível compilar estes modos de transferência em um gráfico denominado de mapa de transferência (Figura 3).

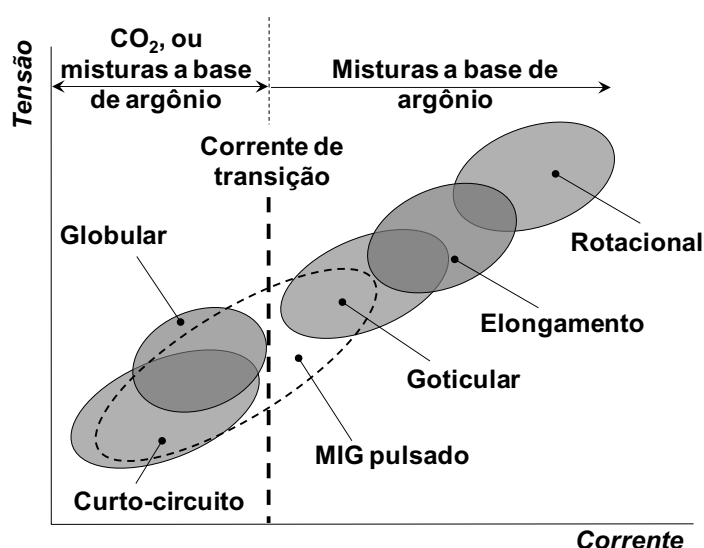


Figura 3. Mapa de transferência didática (ADAPTADO DE VILARINHO, 2007)

Em consonância com os avanços da tecnologia de fontes de soldagem e de sistemas de controle, o IIW (*International Institute of Welding*) vem propondo atualizações na classificação dos modos de transferência metálicas. A Figura 4 representa os modos de transferência conforme a classificação do IIW para a transferência por curto-circuito com aumento da corrente, à medida que se caminha dos modos A para E.

Na transferência por curto-circuito, há o contato da gota com a poça antes de seu destacamento. A principal limitação da transferência por curto-circuito é a geração de respingos durante o rompimento da ponte líquida entre o eletrodo e a poça pelo Efeito Pinch, que diminui a capacidade de produção, seja devido à perda de material de adição ou à necessidade de gasto de recursos para sua retirada (SOUZA, 2011). Uma boa estabilidade é obtida quando utilizado gases com CO<sub>2</sub> (menor custo e maior aporte térmico) ou misturas Ar+CO<sub>2</sub> (menor nível de respingo) (VILARINHO, 2007).

Esse modo de transferência por curto-circuito é particularmente útil na união de materiais de pequena espessura em qualquer posição, materiais de grande espessura nas posições vertical e sobrecabeça, e no enchimento de largas aberturas. Na soldagem com transferência por curto-circuito são utilizados arames de diâmetro na faixa de 0,8 mm a 1,2 mm, e aplicados pequenos comprimentos de arco (baixas tensões) e baixas correntes de soldagem (FORTES, 2005).

Na transferência por voo livre (globular, goticular e explosiva), a gota se destaca antes de tocar a poça, no qual, pequenas gotas de metal fundido são desprendidas da ponta do arame e projetadas por forças eletromagnéticas em direção à poça de fusão (FORTES, 2005).

A transferência globular ocorre quando as gotas de metal fundido são muito grandes e movem-se em direção à poça de fusão sob a influência da gravidade (FORTES, 2005). É caracterizada pelo uso de baixas correntes, mas com uma maior tensão de arco e com frequência de transferência menor que 100 Hz (baixa e irregular). As soldagens são limitadas à posição plana, com uma grande instabilidade de arco, limitando seriamente o uso deste modo de transferência (VILARINHO, 2007).

A transferência goticular ocorre quando se aumenta a corrente acima de um nível denominado de corrente de transição (Figura 3), procurando-se manter o mesmo comprimento do arco. Haverá a mudança do modo de formação da gota numa pequena faixa de corrente (corrente de transição), passando de grandes gotas em baixa frequência (globular) para pequenas gotas em alta frequência (goticular), normalmente acima de 200 Hz (VILARINHO, 2007). Destaca-se que o valor da corrente de transição é função do material, diâmetro e comprimento do eletrodo, assim como do gás de proteção e DBCP (VILARINHO, 2007).

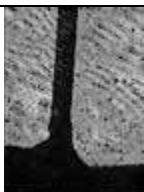
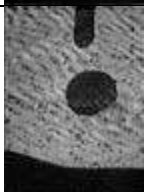
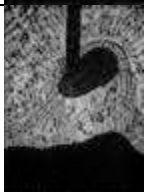

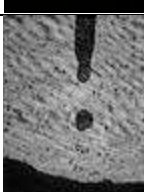



Proposta de classificação pelo IIW			Tipo fundamental	Figura
Fundamental	Variante			
A	Curto-circuito	Curto-circuito	Natural	
		Curto-circuito controlado	Controlado	
B	Globular	Globular em gotas	Natural	
		Globular repelida	Natural	
C	Pulsada projetada	Pulsada	Controlado	
D	Goticular (spray)	Goticular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

Figura 4. Modos naturais de transferência metálica por curto-circuito segundo classificação do IIW (ADAPTADO DE VILARINHO, 2007)



Aumentando-se ainda mais a corrente e mantendo-se o comprimento do arco, forma-se um cone líquido na ponta do eletrodo e gotas com diâmetros menores que o diâmetro do eletrodo se transferem, o que caracteriza a transferência com alongamento. 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 (VILARINHO, 2007).

Já a transferência explosiva é classificada como uma variante da goticular e se caracteriza por gotas que explodem antes do destacamento, em função da presença de elementos de baixo ponto de vaporização, causando muitos fumos e respingos (VILARINHO, 2007).

Para Scotti & Ponomarev (2008), os modos de transferência metálica de forma geral apresentam limitações quando se requer a otimização de características operacionais, como por exemplo, soldar chapas finas ou fora da posição plana sem respingos. Esta solução só foi possível com a implementação de equipamentos modernos, que controlam a transferência metálica.

As transferências controladas são obtidas por meio da utilização de fontes de soldagem que permitem obter formatos de onda específicos para a corrente, com ou sem monitoramento da tensão conseguida. As tecnologias mais comumente encontradas são a pulsada e o curto-circuito controlado, obtidas via modificações e monitoramento dos formatos de onda dos parâmetros elétricos e refletem o desenvolvimento da tecnologia das fontes de soldagem (VILARINHO, 2007).

Como exemplo de fontes controladas comerciais que utilizam a transferência por curto-circuito, pode-se citar a patente de 1994 da empresa Lincoln Electric com a tecnologia STT (*Surface Tension Transfer*), que foi desenvolvida prometendo um avançado controle do processo de curto-circuito ao utilizar uma fonte inversora de alta potência. Já em 2004, o fabricante Miller Electric introduziu a tecnologia de soldagem chamada de RMD (*Regulated Metal Deposition*) e em 2005, a empresa Fronius patenteou a tecnologia chamada de *Cold Metal Transfer* (CMT). Além dessas tecnologias, existem outras no mercado, que estão em contínuo aprimoramento.

A seguir, a transferência por curto-circuito é apresentada em maiores detalhes por ser o foco do presente trabalho.

### 2.2.1 Transferência por curto-circuito convencional

A transferência por curto-circuito ocorre numa ampla faixa de corrente, dependente da ação da tensão superficial quando a gota encosta na poça de fusão para faixas de tensão de soldagem entre 13 a 24 V, ou seja, para arcos curtos (SCOTTI & PONOMAREV, 2008). Nesse modo de transferência, o arame entra em curto-circuito com a peça de 20 a 200 vezes por segundo (FORTES, 2005). A Figura 5 ilustra as etapas do modo curto-circuito convencional em função do comportamento da gota.

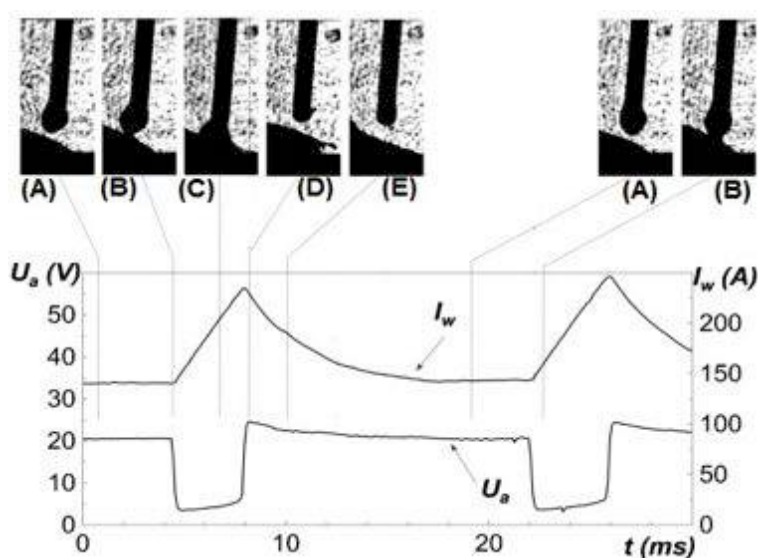


Figura 5. Oscilogramas representativo com valores típicos de tensão e corrente para o processo GMAW na transferência por curto-circuito em função do comportamento da gota (ADAPTADO DE PONOMAREV, 2012)

A fase inicial de pré curto-circuito, no qual o comportamento da gota é indicado na Figura 5 (A), é a etapa de formação e crescimento da gota na ponta do eletrodo. Na medida em que a gota cresce, o comprimento do arco diminui.

O início do curto-circuito (B) é marcado quando a gota em crescimento toca a poça de fusão, a tensão cai bruscamente e a corrente aumenta a elevadas taxas. Nesta fase há o apagamento momentâneo do arco. A transferência ocorre por tensão superficial e inicia-se a contribuição do Efeito Pinch. A taxa de subida da corrente está diretamente relacionada à ocorrência de respingos (VILARINHO, 2007).

Na fase (C), parte da gota já foi transferida para a poça de fusão e uma ponte formada entre o eletrodo e a poça de fusão tem inícios de rompimento. Nesse estágio, a tensão continua a níveis baixos e corrente de soldagem continua a aumentando. Com o crescimento da corrente, aumenta a densidade de corrente na parte superior da gota, a

força eletromagnética passa a ser decisiva e, portanto, favorece a formação do “empescoçamento” entre a gota e a ponta do eletrodo, contribuindo no destacamento da gota (Efeito Pinch).

O componente radial da força eletromagnética tende a comprimir a área de contato, enquanto o axial tende a separar a gota da superfície da poça de fusão e o alto valor de corrente nesta região provoca o aquecimento súbito, proporcionando uma explosão elétrica, o que promove a evaporação e a explosão do metal fundido em forma de respingos (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

Na fase (D), acontece o rompimento da gota ou ponte metálica, e a tensão sobe bruscamente representando um pico de reignição do arco para reabrir o arco. A corrente a partir desse momento começa a cair para a corrente de regime. Não há metal transferido durante o período de arco aberto, somente nos curtos-circuitos (FORTES, 2005). A alta corrente favorece a formação de uma nova gota, pois, a taxa de fusão neste momento é maior que a de alimentação.

Nas fases (E e A), a corrente decresce e começa a formação de uma nova gota na ponta do eletrodo, reiniciando o processo.

Com relação à aplicabilidade da transferência por curto-circuito, Vilarinho (2007) destaca que este modo de transferência tem sua esfera de aplicação em soldagem de chapas finas e soldagens posicionais, devido ao menor aporte térmico. Já Fortes (2004) ressalta que a transferência por curto-circuito é caracterizada por um arco frio, é ideal para passes de raiz em juntas com abertura e especialmente para a soldagem fora de posição em peças de pequena espessura. No entanto, a falta de fusão lateral pode ser um problema quando se soldam peças mais espessas (acima de 6,0 mm), pois o aporte térmico é baixo.

#### **2.2.1.1 Parametrização do processo GMAW curto-circuito convencional**

Ao parametrizar qualquer fonte de soldagem convencional primeiramente deve-se definir qual o tipo de fonte de soldagem utilizada, pois, a forma de regular os parâmetros e a “facilidade” de soldagem é dependente do tipo de fonte. Teoricamente os tipos de fonte de soldagem existentes são de tensão constante ou corrente constante.

A fonte de tensão constante é aquela que permite a regulação da tensão de trabalho, tornando a corrente de soldagem dependente da fixação dos demais parâmetros (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

A fonte de corrente constante é aquela que permite a regulação da corrente de trabalho, e a tensão de soldagem, que não é regulável, passa a ser dependente da fixação dos parâmetros (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

Os parâmetros principais de regulação da fonte de tensão constante são tensão e velocidade de alimentação. Geralmente, na fonte tipo corrente constante os parâmetros ajustados são de corrente e velocidade de alimentação.

Para algumas fontes de corrente constante pode-se ajustar opcionalmente tensão e corrente, ao invés de ajustar tensão e velocidade de alimentação (DUTRA, 2002). O ajuste de tensão nestes casos substitui de maneira indireta o parâmetro velocidade de alimentação, na forma de uma tensão de referência para se garantir um determinado comprimento de arco, atuando-se como um controle externo ao processo.

No caso da transferência por curto-circuito, deve-se optar por fontes com característica tensão constante, haja vista, que o aumento da corrente ilustrado na Figura 5 durante a fase de curto-circuito é fundamental para que haja o Efeito Pinch e o consequente rompimento da ponte líquida pela ação da força eletromagnética em conjunto com a força devido à ação da tensão superficial. Caso a fonte tivesse característica estática do tipo corrente constante, a corrente tenderia a ficar constante (sem aumento significativo).

Além disso, ao se utilizar uma fonte corrente constante com ajuste incorreto pelo operador, ao iniciar a soldagem, pode não haver o correto balanço entre a taxa de fusão/consumo (corrente) e a de alimentação (velocidade de alimentação). Assim, caso a corrente esteja ajustada com um valor alto para uma dada velocidade de alimentação imposta pela fonte, o arame é consumido com muita rapidez.

Nesse caso há uma dificuldade em soldar com fonte de corrente constante sem controle externo, pois, a dificuldade em acender o arco é maior. Supondo uma velocidade de alimentação baixa (ex. 3 m/min) e uma corrente de alta (p.ex., 300 A) consegue-se abrir o arco, mas queimará o bico, pois, o consumo do arame é maior que a velocidade de alimentação imposta pela máquina, fazendo com que o arco escale até o bico, queimando-o. Para uma corrente muito baixa e velocidade de alimentação muito alta, o arame é enterrado na poça de fusão.

Por outro lado, caso haja controle externo, um consumo rápido do arame tende a aumentar o comprimento do arco e por consequência aumentar a tensão, o que leva o controle a perceber esse aumento de tensão e a enviar um comando para o motor do alimentador aumentar a velocidade do arame.

Assim, a ação de um controle externo em uma fonte de soldagem convencional pode calcular indiretamente a velocidade de alimentação que seja compatível com a corrente

anteriormente parametrizada pelo operador, conforme a variação da tensão durante a soldagem, mantendo assim a DBCP constante.

Em máquinas de corrente constante que não possuam o controle externo (cálculo da velocidade de alimentação indireta por meio de regulação da corrente), na prática, ao se iniciar uma soldagem em que não se sabe a corrente correta, sugere-se regular uma velocidade de alimentação alta para uma corrente moderada até abrir o arco, pois, ao se iniciar com velocidade de alimentação baixa para uma dada corrente (alta) ajustada erroneamente, a probabilidade de queimar o bico da tocha é maior, devido ao alto consumo do arame. Assim, demonstra-se a grande dificuldade em soldar pelo processo convencional com fonte do tipo corrente constante, pois, em soldagem a carga é desconhecida.

Por outro lado, como dito anteriormente, a fonte de tensão constante é caracterizada por ter a corrente de soldagem como consequência e não sendo imposta. Logo, o consumo exagerado do arame durante a abertura do arco para uma dada velocidade de alimentação regulada, não é empecilho, facilitando a soldagem (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

Destaca-se que para análises mais profundadas e detalhadas da influência dos parâmetros no processo, levando-se em consideração o tipo de fonte (tensão ou corrente) e fatores fixos (DBCP ou velocidade de alimentação, etc), a Eq. 6 juntamente com a análise da característica estática do arco (Figura 6) podem auxiliar (SCOTTI & PONOMAREV, 2008). Para facilitar a análise da Eq. 6 é necessário considerar o consumo igual a velocidade de alimentação para a manutenção do arco.

$$Cons = \alpha I_s + \beta L_{el} I_s^2 \quad (6)$$

Onde, “Cons” é o consumo, “ $\alpha$ ” e “ $\beta$ ” são dependentes das composições químicas do gás de proteção e do eletrodo (resistividade elétrica), da polaridade, e do diâmetro do eletrodo;  $L_{el}$  é o comprimento energizado do arame-eletrodo e  $I_s$  a corrente de soldagem.

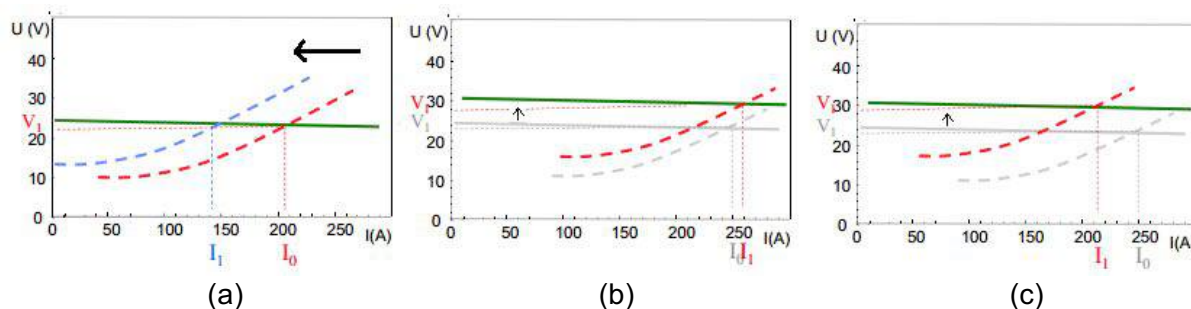


Figura 6. Controle interno da fonte (característica estática do arco)

Exemplificando a interação entre a Eq. 6 e a característica estática do arco como ferramentas de auxílio, pode-se dizer que, se considerar o ponto “0” na Figura 6 como sendo o ponto de trabalho inicial, verifica-se que existem duas formas de modificar o comprimento do arco mantendo o consumo: aumentando a tensão ou diminuindo a velocidade de alimentação.

Optando-se por diminuir a velocidade de alimentação, a corrente fica menor (Figura 6a) o arco se tornaria mais alto para manter o consumo (balanço da Equação 6), mas, deposita-se menos material por unidade de comprimento, por diminuir a taxa de deposição em detrimento da diminuição da velocidade de alimentação. Este caso é utilizado quando já se tem uma penetração boa ou já está depositando muito material.

Assim a melhor opção seria aumentar a tensão, pois se mantém a velocidade de alimentação constante e consequentemente o comprimento do arco aumentaria (Figura 6c), sem grandes prejuízos para a taxa de deposição. Caso venha aumentar levemente a tensão, o arco aumentaria levemente e a corrente ficaria levemente maior (Figura 6b).

Ressalta-se que o entendimento da Eq.6 e das curvas de característica estática do arco servem como ferramenta de auxílio para parametrização do processo convencional.

Além deste balanço necessário ao consumo do eletrodo é importante destacar os parâmetros avaliados neste trabalho para o processo GMAW curto-circuito convencional e sua influência na transferência metálica.

#### *a) Tensão de soldagem*

A regulação da tensão de soldagem tem a função de controlar o comprimento do arco, de forma que a diminuição da tensão implica em um arco mais curto. A soldagem por curto-circuito requer níveis mais baixos de tensão, pois, utiliza-se arco mais curto (VILARINHO, 2007). Na soldagem de dutos de pequenos diâmetros (2½” de diâmetro nominal) em único passe, a tensão de soldagem influencia no aumento da penetração dos cordões, onde o maior valor resulta em perfuração do cordão (COSTA, 2011). De acordo com Costa (2012) na soldagem descendente a largura do cordão aumenta com a tensão.

#### *b) Indutância*

A regulação da indutância, ou a taxa de variação da corrente influencia diretamente no efeito Pinch e na geração de respingos. Para indutância baixa, um gradiente elevado da subida de corrente de curto-circuito acontece causando o destacamento da gota de forma violenta no momento em que a gota toca a poça de fusão. Esta ação contribui para o aumento de respingos devido à ação das forças eletromagnéticas e do efeito Pinch.

Por outro lado, a indutância alta reduz a taxa de subida da corrente de curto-circuito e, assim, minimiza a ação do efeito Pinch e consequentemente diminui os respingos. Entretanto, se a indutância for muito alta (a corrente se eleva muito lentamente), a gota pode levar muito tempo para se destacar e, neste caso a ponta do arame pode acabar mergulhando na poça de fusão, causando à extinção do arco (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

Magalhães (2012) não observou grande significância na variação desse parâmetro quando se utilizou indutância constante e igual a 40 (fonte PipePro 450 RFC) para faixas de velocidade de alimentação entre 2,3 m/min e 3,3 m/min e velocidades de soldagem entre 26,7 cm/min e 38,4 cm/min.

#### *c) Velocidade de alimentação*

Ao se utilizar fonte de tensão constante, a velocidade de alimentação do arame estará diretamente relacionada com a corrente de soldagem e com a taxa de deposição. Quanto maior a velocidade de alimentação, maior é a produtividade (MAGALHÃES, 2012).

Com o aumento da velocidade de alimentação, aumenta-se a corrente para aumentar a taxa de fusão. Costa (2012) ressalta que o aumento da velocidade de alimentação na progressão descendente tende a aumentar o reforço da raiz e a diminuir o reforço e a largura da face do cordão para um único passe.

#### *d) Velocidade de soldagem*

A redução da velocidade de soldagem aumenta a quantidade de material depositado por unidade de comprimento da solda. Vargas (2011) cita que velocidades de soldagem muito baixas, além de elevar o custo da operação podem causar alterações metalúrgicas na estrutura do material devido à concentração térmica.

A redução da velocidade de soldagem a níveis muito baixos pode resultar na redução da penetração causado pelo efeito da sobreposição. Níveis de velocidade de soldagem muito baixos pode aumentar o volume da poça de fusão e o calor do arco passa a atuar sobrepondo o cordão não diretamente na poça de fusão, reduzindo a penetração (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

O controle da velocidade de soldagem pode manter a penetração do cordão de solda constante. De acordo com Costa (2011), para o controle da poça de fusão (reduzir o escorrimento da poça de fusão), na progressão descendente, deve-se utilizar maiores níveis de velocidade de soldagem. Por outro lado, Vargas (2011) cita que velocidade de soldagem muito alta provoca menor penetração, menor largura do cordão, diminui a ação de

molhamento, aumentando a tendência a mordeduras, apagamento do arco, porosidades e trincas.

Ressalta-se que outros parâmetros, gás de proteção, diâmetro/material do eletrodo, dentre outros, também possuem influência relevante sobre o processo, mas não são objetos de avaliação neste trabalho.

Além desses parâmetros, em algumas fontes de soldagem convencionais encontradas no mercado existem ainda outras opções de ajuste de parâmetros, sendo elas:

- Tensão de abertura do arco: Tensão mínima de curto-circuito em que o equipamento considera que o sistema está em curto-circuito.
- Corrente de Curto-Circuito: Tem a função de manutenção da abertura do arco. Neste parâmetro quando a máquina interpreta que o arame encostou-se à peça, ou seja, entrou em curto-circuito (conforme parâmetro de tensão referência ajustado na tensão de abertura do arco), a fonte aumenta para a corrente de curto-circuito regulada para manter o arco.
- Rampa de velocidade de alimentação: É a velocidade de alimentação antes da abertura do arco. Nesta rampa antes da abertura do arco a velocidade de alimentação é baixa (facilita a abertura do arco, pois, o consumo aumenta), após a abertura do arco a velocidade de alimentação aumenta para a velocidade parametrizada.
- Rampa de fechamento de cratera: Utilizada para apagamento do arco. Esta deve ser parametrizada para iniciar antes do apagamento do arco, no qual, a energia deve ser interrompida de forma que o arame não cole na peça e não queime o bico. Ou seja, se a velocidade de alimentação for interrompida antes de desligar a energia, o arame é totalmente consumido, deixando cratera e queimando o bico. Caso a energia seja desligada e logo após desligar a velocidade de alimentação, o arame cola na peça.

## **2.2.2 Transferência por curto-circuito controlado (STT)**

A tecnologia STT do fabricante Lincoln Electric faz uso da eletrônica para controlar a corrente durante todo o ciclo de soldagem. Este processo GMAW derivativo não tem características de fonte corrente constante (CC) e nem de fonte de tensão constante (VCC). Em vez disso, a fonte de alimentação de corrente ajusta automaticamente para os requisitos instantâneos de calor do arco e controla a corrente de soldagem, independentemente da velocidade de alimentação (LINCOLN ELECTRIC, 2005).



A tecnologia STT se baseia no controle de forma de onda avançada por meio de inversor de frequência para produzir uma solda de alta qualidade com menos respingos, radiação de calor e fumos. A Figura 7 apresenta o formato real de onda de tensão e corrente característico do processo (VILARINHO ET AL, 2014). Já na Figura 8 é apresentado o comportamento esquemático da corrente de acordo com o comportamento da gota.

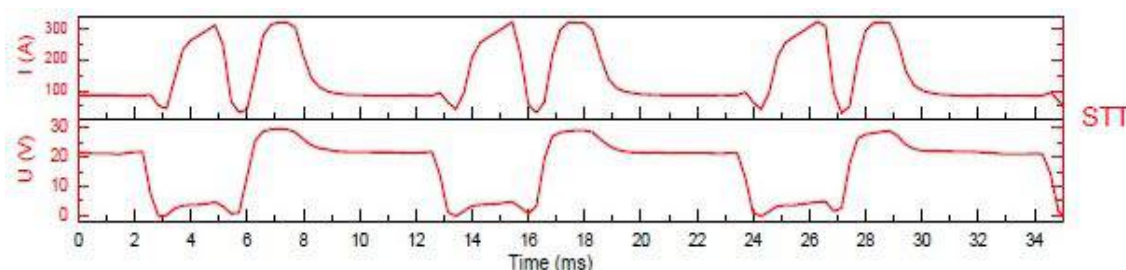


Figura 7. Formatos reais de onda de tensão e corrente da tecnologia STT (ADAPTADO DE VILARINHO, 2014)

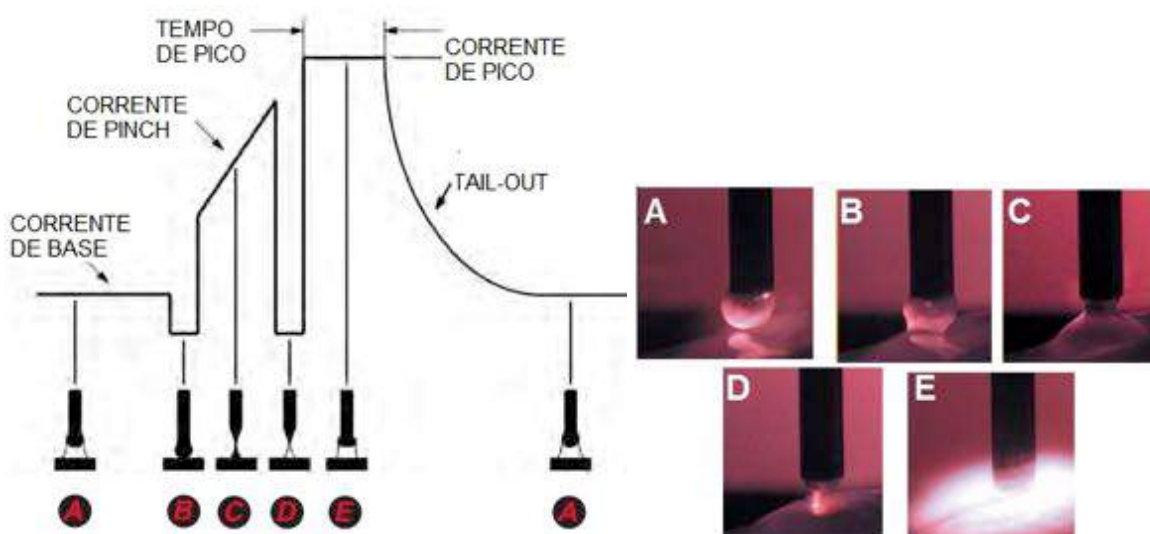


Figura 8. Oscilograma esquemático de controle da corrente para o processo STT (ADAPTADO DE LINCOLN ELECTRIC, 2005)

É possível descrever o funcionamento dessa tecnologia pelas fases apresentadas na Figura 8. Na Fase A, a gota, formada na ponta do arame-eletrodo, é mantida por um valor baixo de corrente (corrente de base). Esta fase é praticamente igual à formação da gota no GMAW convencional. Já na Fase B, a gota aumenta de tamanho causando o contato com a poça de fusão. O equipamento ao detectar o curto-circuito reduz imediatamente a corrente e a mantém até que ocorra o contato da gota com a poça, reduzindo o risco de repulsão da

gota e respingos (SCOTTI & PONOMAREV, 2008). A corrente é reduzida para 10 A por aproximadamente 0,75 ms (DERUNTZ, 2003), de modo que as forças de tensão superficial possa começar a transferir a gota à poça, formando uma ponte mecânica sólida (LINCOLN ELECTRIC, 2005).

Durante a Fase C, o processo está em fase de curto-circuito e, portanto, é aplicada uma corrente de *Pinch*, de acordo com a curva pré-determinada, de forma a acelerar o processo. Nesta fase a força eletromagnética atua para formar o “empescoçamento” (LINCOLN ELECTRIC, 2005).

Na Fase D, ocorre a separação total da gota. A corrente é reduzida pouco antes da separação para que o destacamento da gota aconteça sob um nível baixo de corrente, impedindo grandes quantidades de respingos (SCOTTI & PONOMAREV, 2008). Após a separação a fonte limita a corrente em 50 A em poucos microssegundos (DERUNTZ, 2003).

Finalmente na Fase E, é aplicada uma corrente de pico para reestabelecer o arco (LINCOLN ELECTRIC, 2005). Esta corrente também responsável pela fusão do arame, pelo comprimento do arco e o início da formação de uma nova gota. A taxa de descida entre a corrente de pico e a de base, durante a formação da gota, é controlada pelo parâmetro *Tail-out*. Após o término do decaimento da corrente o processo se inicia com a formação de uma nova gota, voltando, assim, para a Fase A.

A transferência por curto-circuito derivativo por meio da tecnologia STT apresenta vantagens em relação ao processo GMAW convencional, dentre eles pode-se citar:

- Destacada redução de perda de material por respingos e na geração de fumos, o que favorece maior produtividade do processo e a maior transferência de calor para a poça de fusão (STAVA, 2001);
- Enquanto no processo convencional a entrega de calor na soldagem é de aproximadamente 30 kJ por polegada, no processo STT a entrega é de 7 kJ por polegada. O baixo aporte térmico significa redução das distorções do material e menores tensões residuais (DERUNTZ, 2003; LINCOLN ELECTRIC, 2005);
- Para soldagem de tubos, o processo também faz com que seja mais fácil de executar passes de raiz com menor probabilidade de falta fusão lateral, com menos respingos e fumos (LINCOLN ELECTRIC, 2005). É especialmente aplicado em soldas de raiz, espessuras finas e aplicações automatizadas (BRACARENSE ET AL, 2015).

Por fim, DeRuntz (2003) cita que uma das principais desvantagens é o maior custo de uma fonte de soldagem STT frente a uma fonte convencional. Além disto, a fonte STT requer operadores qualificados, devido à necessidade de seleção de um maior número de parâmetros.

### 2.2.2.1 Parametrização do processo GMAW curto-circuito derivativo (STT)

Para a parametrização do processo GMAW derivativo com tecnologia STT, além do entendimento dos parâmetros para o processo convencional mencionados anteriormente (item 2.2.1), é necessário conhecer a influência dos parâmetros corrente de base ( $I_b$ ), corrente de pico ( $I_p$ ) e tail-out ( $T_{out}$ ), que podem influenciar no resultado final e cujas funções são descritas a seguir.

#### a) Corrente de base ( $I_b$ )

A corrente de base é responsável pelo controle da transferência de energia para a poça de fusão, funcionando com “ajuste fino” (LINCOLN ELECTRIC, 2005). A corrente de base também é responsável pelo aquecimento do eletrodo e do metal de base, garantindo a formação e manutenção da gota formada na ponta do eletrodo.

Scotti & Ponomarev (2008) mencionam que o nível da corrente de base depende do tipo de gás de proteção, da velocidade de alimentação, do material e do diâmetro do eletrodo. Uma corrente de base (background) entre 50 e 100 A mantém a estabilidade do arco e contribui para o aquecimento do metal base (LINCOLN ELECTRIC, 2005). À medida em que aumenta a corrente de base, aumenta-se a quantidade de respingos, a corrente média, a tensão média e também a instabilidade da transferência. Entretanto, quando a corrente de base é baixa, a largura do cordão diminui bastante e o cordão fica bem estreito (MAGALHÃES, 2012).

A Figura 9 apresenta a influência da corrente de base na geometria do cordão. Costa (2012) destaca que o aumento da corrente de base na progressão ascendente favorece o aumento da penetração. Por outro lado, o aumento da corrente de base na progressão descendente reduz a penetração do cordão.

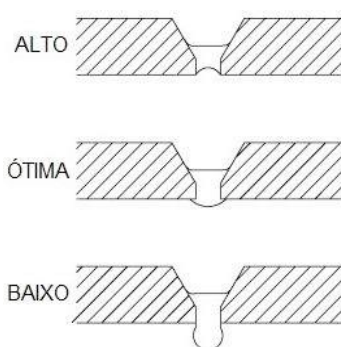


Figura 9. Influência da corrente de base na geometria do cordão (ADAPTADO DE LINCOLN ELECTRIC, 2005)

*b) Corrente de pico ( $I_p$ )*

De acordo com Scotti & Ponomarev (2008), este parâmetro auxilia nas forças de jato do arco, que atuam em direção da poça de fusão para comprimi-la, minimizando a probabilidade de curtos-circuitos pré-maturos. De acordo com Magalhães (2012), o aumento da corrente de pico diminui a frequência de curto-circuito, portanto, diminui a quantidade de picos e por consequência causa a diminuição da corrente média.

A Figura 10 apresenta a influência da corrente de pico na geometria do cordão e penetração.

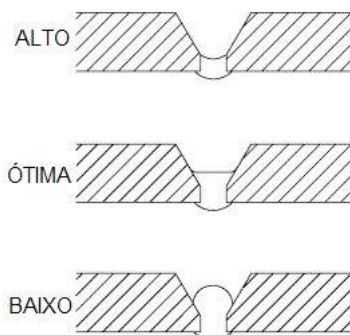


Figura 10. Influência da corrente de pico na geometria do cordão (ADAPTADO DE LINCOLN ELECTRIC, 2005)

*c) Tail-out ( $T_{out}$ )*

Em analogia ao processo por curto-circuito convencional este parâmetro é equivalente a uma regulação de indutância, influenciando na frequência de curto-circuito e, consequentemente, no volume e conteúdo calorífico das gotas (SCOTTI & PONOMAREV, 2008). À medida que se aumenta o valor de  $T_{out}$  a transferência fica mais instável e com mais respingos, não provoca variação significativa na corrente e aumenta a tensão média (MAGALHÃES, 2012). Logo, aumentando o  $T_{out}$  a largura do cordão aumenta (devido ao aumento da tensão). Costa et al. (2012) ressaltam que este parâmetro apresenta comportamentos semelhantes a velocidade de alimentação. A Figura 11 mostra a representação esquemática do parâmetro *Tail-out*.

De acordo com Costa (2011), a utilização de maiores níveis de corrente de base e *Tail-out* possibilita o aumento do escoamento da poça de fusão na posição vertical e sobrecabeça, ocasionando à falta de penetração. Segundo Rossi (2011), o aumento da corrente de base, corrente de pico e do *Tail-out*, reduz o aumento da penetração do cordão.

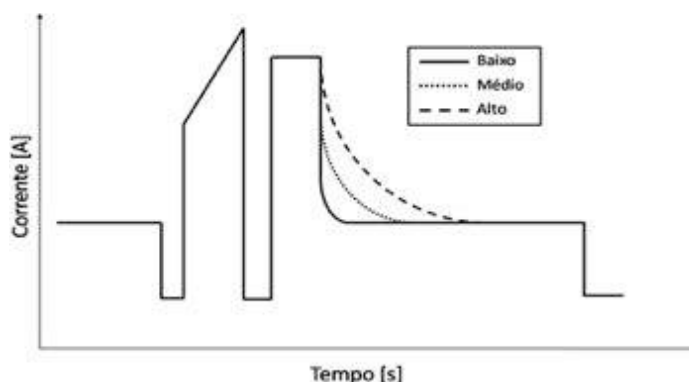


Figura 11. Representação esquemática do parâmetro *Tail-out* (LINCOLN ELECTRIC, 2005)

Estes fatos demonstram que o entendimento da interação entre os parâmetros é de suma importância para a realização de um cordão de qualidade e quando utilizados fora de posição podem auxiliar a conter o escoamento.

### 2.2.3 Índice de regularidade

Para auxiliar na seleção de parâmetros mais apropriados para se obter uma transferência por curto-circuito mais uniforme (maior regularidade), associada a um cordão com melhores características (perfil geométrico mais uniforme, p.ex.), é importante estabelecer ferramentas que direcionem essa seleção.

Nesse sentido, o Índice de Regularidade (IVcc) desenvolvido pelo Grupo Laprosolda é uma ferramenta baseada na premissa de que a estabilidade do processo de transferência por curto-circuito está ligada com a constância (regularidade) dos tempos em curto-circuito e em aberto, ou seja, acredita-se que, se os tempos experimentam pouca variação tanto em curto-circuito como em arco aberto, o processo é estável. Dessa forma, a constância nos tempos é medida por meio do coeficiente de variação, que leva em conta não somente o desvio padrão da amostra, mas também sua média, mostrada na Eq. 7 (MACHADO ET AL, 2013). Assim, quanto mais próximo de zero for o IVcc mais regular é o curto-circuito.

$$IV_{cc} = \frac{\sigma_{tcc}}{tcc} + \frac{\sigma_{tab}}{tab} \quad (7)$$

Onde, “ $\sigma_{tcc}$ ” é o desvio padrão da média do tempo de curto-circuito; “ $\sigma_{tab}$ ” é o desvio da média padrão do tempo de arco aberto, “tcc” a média do tempo de curto-circuito e “tab” a média do tempo de arco aberto.

## 2.3 Parametrização envolvendo dutos

Neste subitem são apresentados os envelopes de trabalho e as dificuldades relacionadas a soldagens de dutos pelo processo GMAW. Embora possam existir outros envelopes de trabalho na literatura, serão apresentados aqueles que mais se aproximam das condições de soldagem utilizadas na presente pesquisa.

### 2.3.1 Envelopes de trabalho

Magalhães (2012) estudou a soldagem do passe de raiz com uso de transferência metálica por curto-circuito (convencional e derivativo) por meio da retificação da soldagem de dutos com processo GMAW. No seu trabalho, foram realizadas soldagens variando-se os parâmetros de soldagem e gás proteção (Ar+25%CO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> puro) para o passe de raiz com o processo GMAW com transferência metálica por curto-circuito convencional e controlado utilizando-se fontes comerciais. Mantiveram-se constantes a distância bico contato peça (DBCP) em 15 mm, folga de 3 mm e 4 mm, chanfro com ângulo de 15°, eletrodo ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro, preparação em V com bisel de 15°.

Na Figura 12 e na Figura 13 são apresentados os envelopes de trabalho finais obtido para o processo GMAW curto-circuito convencional e controlado com tecnologia STT utilizando-se os gases Ar+25%CO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> puro para juntas alinhadas e com desalinhamento (H/L = *High/Low*).

Para manter o mesmo volume de material depositado na junta, a relação entre a velocidade de alimentação ( $V_a$ ) e a velocidade de soldagem ( $V_s$ ) deve ser constante. Nesse sentido, Magalhães (2012) percebeu que relações  $V_a/V_s$  maiores que 16,4 implicam no aumento da ocorrência de falta de penetração no passe de raiz principalmente na posição vertical descendente devido ao escorrimento do cordão.

Magalhães (2012) destaca ainda que no processo convencional, utilizando-se inicialmente mistura Ar+25%CO<sub>2</sub>, os resultados mais satisfatórios ocorreram com  $V_a = 3,5$  m/min e  $U = 19,0$  V,  $V_a = 5,0$  m/min e  $U = 19,0$  V e com folga de 3 mm. Já para o processo derivativo STT, os resultados mais satisfatórios ocorreram com  $V_a = 5,5$  m/min,  $I_b = 120$  A,  $I_p = 320$  A e  $T_{out} = 8$ .

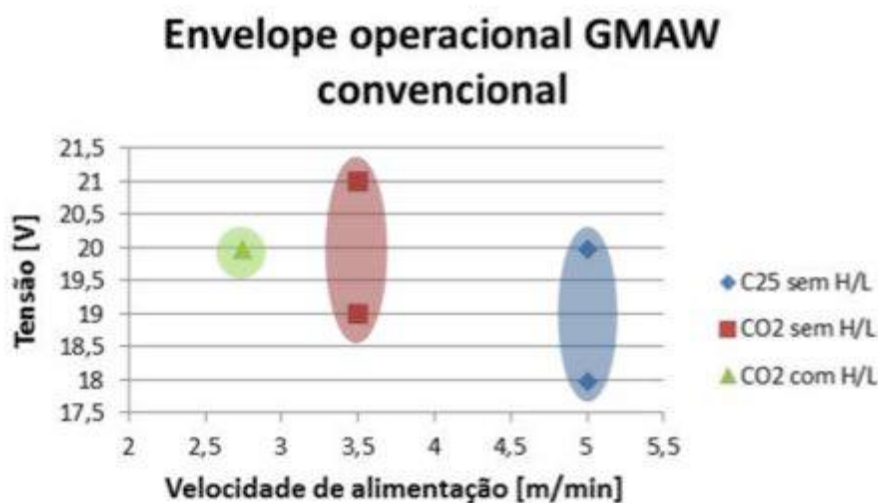


Figura 12. Envelope operacional final para o processo GMAW convencional (MAGALHÃES, 2012)

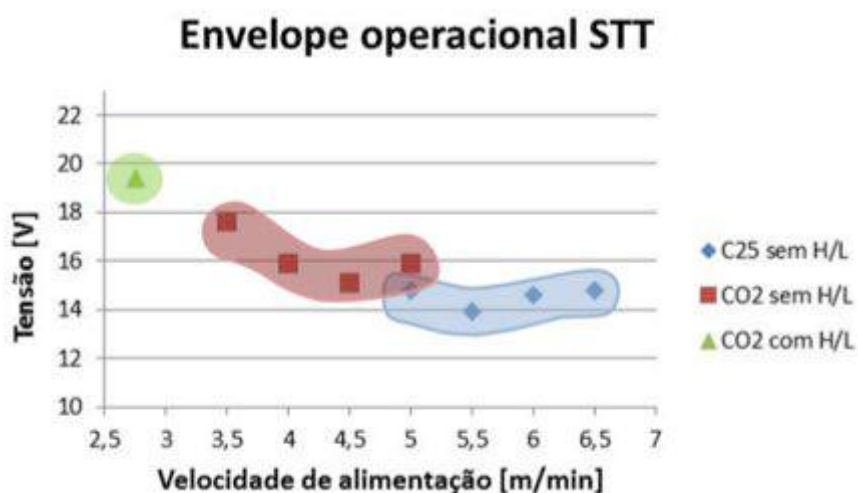


Figura 13. Envelope operacional final para o processo GMAW derivativo STT (MAGALHÃES, 2012)

Scotti et al. (2013) e Vilarinho et al. (2013) avaliaram a soldagem circunferencial em meia cana de tubos API 5L X65 de 8" de diâmetro nominal e 8,0 mm de espessura, em dois passes, junta de topo com chanfro estreito, abertura de 3 mm, preparação em V com bisel de 15°, DBCP de 12 mm, mistura Ar+25%CO<sub>2</sub>, por meio de dispositivo de deslocamento (soldagem mecanizada) e com parâmetros únicos.

A Figura 14 apresenta os envelopes de trabalho encontrados para os processos GMAW convencional e derivativos (CMT, RMD e STT). A Tabela 1 e Tabela 2 apresentam os conjuntos de parâmetros nos quais se obtiveram os melhores resultados para o passe de raiz e acabamento/enchimento.

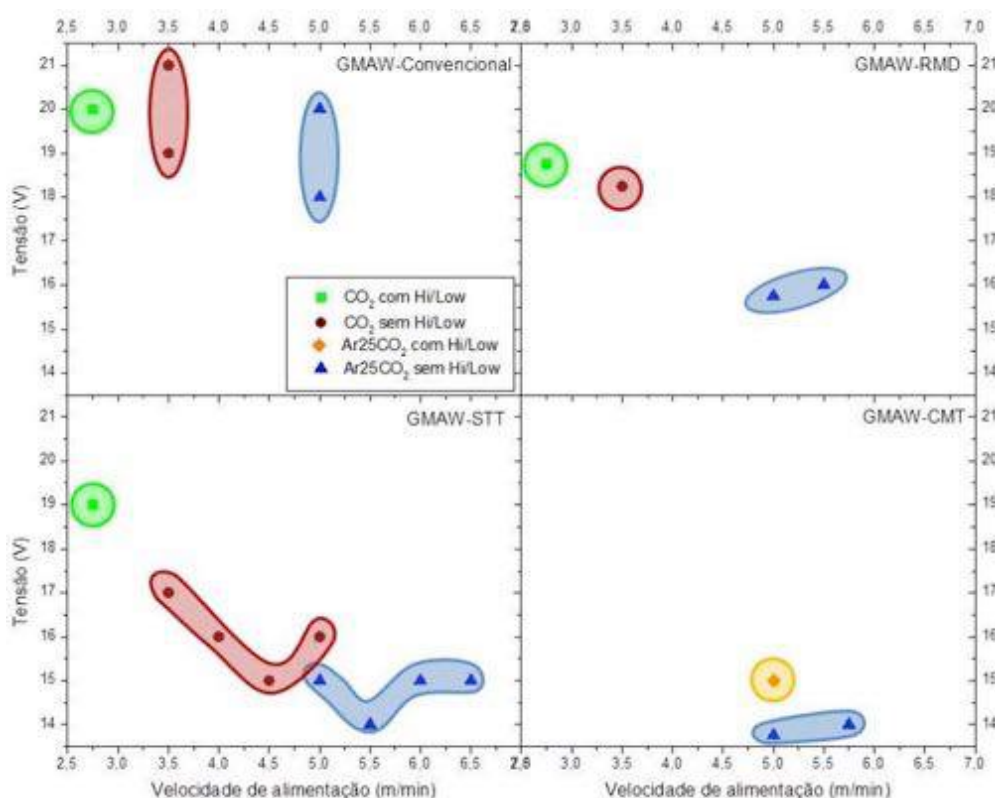


Figura 14. Condições paramétricas para o passe de raiz (SCOTTI ET AL, 2013; VILARINHO ET AL, 2013)

Tabela 1. Parâmetros de soldagem para o passe de raiz

Processo	Velocidade de alimentação [m/min]	Velocidade de soldagem [cm/min]	Frequência de tecimento [Hz]	Parâmetros característicos (ângulo da tocha em 0°)
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	25,0	3,0	CompArco=25; Cont.Din.=2,5

Tabela 2. Parâmetros ajustados para o passe de enchimento/acabamento

Processo	Velocidade de alimentação [m/min]	Velocidade de soldagem [cm/min]	Frequência de tecimento [Hz]	Parâmetros característicos (ângulo da tocha em 0°)
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	20,0	2,2	CompArco=25; Cont.Din.=2,5

Costa (2011) estabeleceu limites operacionais dos processos GMAW com transferência por curto-circuito convencional e controlado (STT, RMD e CMT), visando a união de dutos de pequeno diâmetro (2½") e parede fina (espessura de 5,5 mm) em passe



único, nas progressões ascendente e descendente, com arame eletrodo ER 70S-6 de 1,2mm de diâmetro, mistura Ar+25%CO<sub>2</sub>, com geometria do chanfro proposta pela AWS D10.12 (1989) e mantendo a mesma relação Va/Vs. A Figura 15 mostra o envelope operacional encontrado pelo autor para a progressão de soldagem descendente.

De acordo com Costa et al. (2012), a oscilação da tocha ou a utilização de ângulo negativo de trabalho (soldagem puxando), na progressão descendente, favorece o aumento da penetração, reduz o reforço da face e aumenta o reforço da raiz. Por outro lado, as soldas na progressão ascendente apresentaram maior penetração, mas com maior probabilidade de mordedura e perfuração da raiz.

Costa et al. (2012) ressalta ainda que torna-se mais frequente a perfuração da raiz em cordões de solda executados sem oscilação da tocha. Por outro lado, a oscilação da tocha, na progressão descendente, contribui para a distribuição do calor nas laterais da junta favorecendo maior controle da penetração (aumento), minimizando escoamentos do metal fundido e consequentemente contribuindo para a eliminação da falta de fusão da raiz na vertical e sobrecabeça, além de reduzir o reforço da face e aumentar o reforço da raiz.

Costa (2011) destaca que o curto-circuito convencional trabalha em média num valor mais alto de tensão de soldagem quando comparado com outros processos e que o processo derivativo STT possui uma faixa de trabalho maior de tensão de soldagem. Além disso, o processo derivativo STT na progressão descendente possibilita a realização de soldas com penetração total com diferentes níveis de tensão e de velocidade de alimentação.

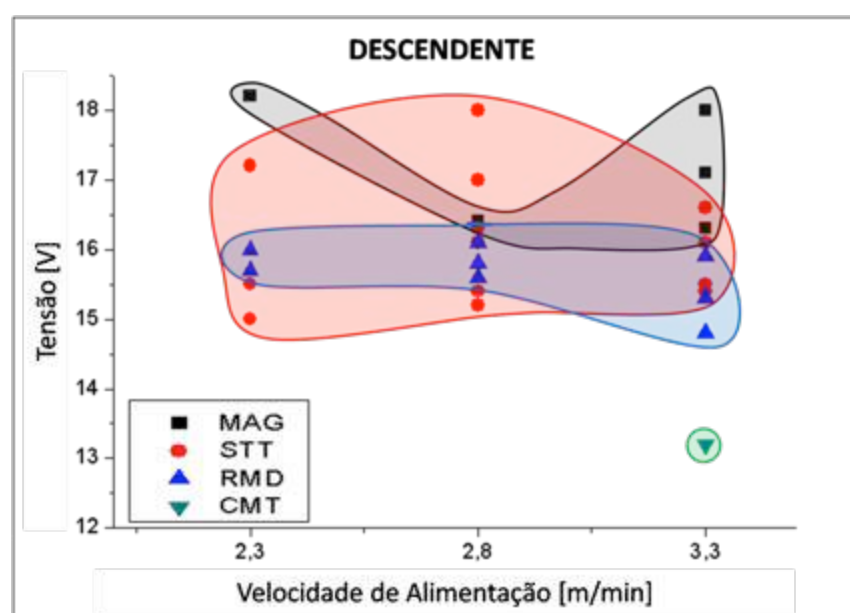


Figura 15. Envelope operacional dos processos GMAW convencional (MAG) e derivativo (CMT, RMD e STT) na progressão descendente (COSTA ET AL, 2012)

### 2.3.2 Dificuldades da soldagem fora de posição

Meneses (2013) ressalta que a posição 5G utilizada na soldagem de dutos e a própria geometria da peça tornam o processo complicado devido à variação contínua da orientação da tocha, o que constitui uma constante mudança no comportamento das forças que atuam sobre a gota de metal fundido e altera a dinâmica da transferência de metal. Este evento faz com que a solda apresente problemas de qualidade, pelo escoamento da poça de fusão e a instabilidade na transferência metálica.

Segundo Scotti et al. (2013), as posições críticas são a plana (12 horas), vertical (15 horas) e sobrecabeça (18 horas), pois, em cada uma destas posições as forças que influenciam no destacamento da gota e na configuração da poça de fusão agem de formas diferentes, sendo a força da gravidade a de maior influência (Figura 16).

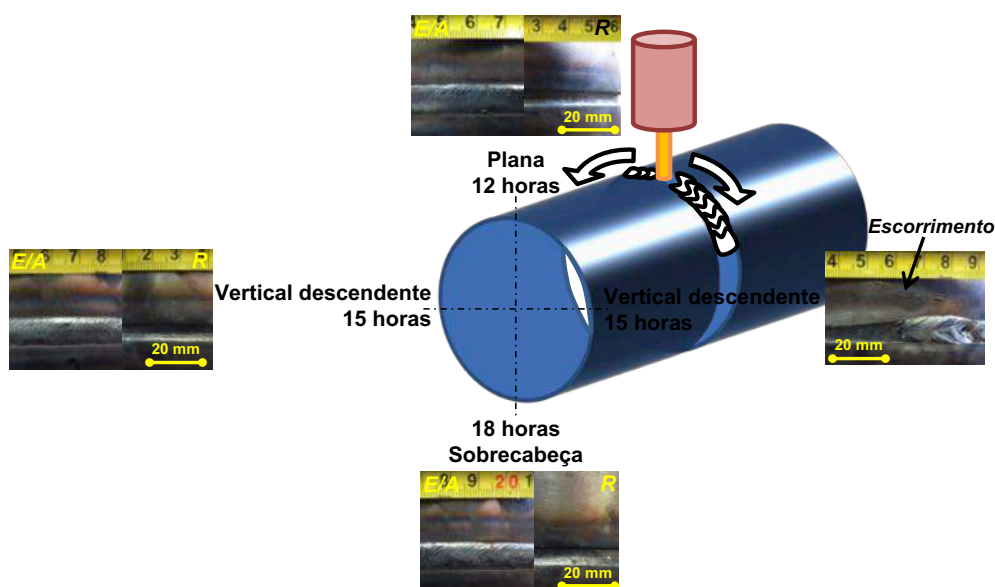


Figura 16. Posições de soldagem e detalhe superficial dos cordões, demonstrando o escoamento da posição 15 horas e aspecto superficial dos cordões em ambos os passes (E/A – Enchimento/Acabamento e R – Raiz) (SCOTTI ET AL, 2013)

Vargas et al. (2014) asseguram que a soldagem na posição vertical, no sentido descendente é a posição mais difícil de soldar, no que se refere à penetração, devido ao fato de que a poça de fusão, sendo líquida, escorrega interferindo entre o arco e o metal base, diminuindo a penetração. Esta afirmação também é destacada por Scotti et al. (2013), que afirmam que a maior limitação para imposição de maiores valores de velocidade de alimentação/corrente é o escoamento da poça na posição 15 horas (vertical descendente).

Nas soldagens fora de posição, as gotas tenderão a se desviar verticalmente para baixo devido a força gravitacional, e se não superada, pode prejudicar na formação do cordão (SCOTTI & PONOMAREV, 2008). Por outro lado, na posição sobrecabeça a gravidade age no sentido de dificultar o destacamento da gota e de fazer a queda do metal fundido (COSTA, 011).

Em relação à geometria do cordão de solda obtido, a Figura 17 apresenta exemplos de macrografias obtidas por Scotti et al. (2013) utilizando-se os processos convencional e derivativo STT. Analisando as macrografias percebe-se a presença de defeitos e na medida que se caminha da posição plana em direção à sobrecabeça, os resultados mostram que a utilização de um único conjunto de parâmetros tende a aumentar o reforço do passe de enchimento e a diminuir a penetração do passe de raiz, devido à atuação da força gravitacional na poça fundida.

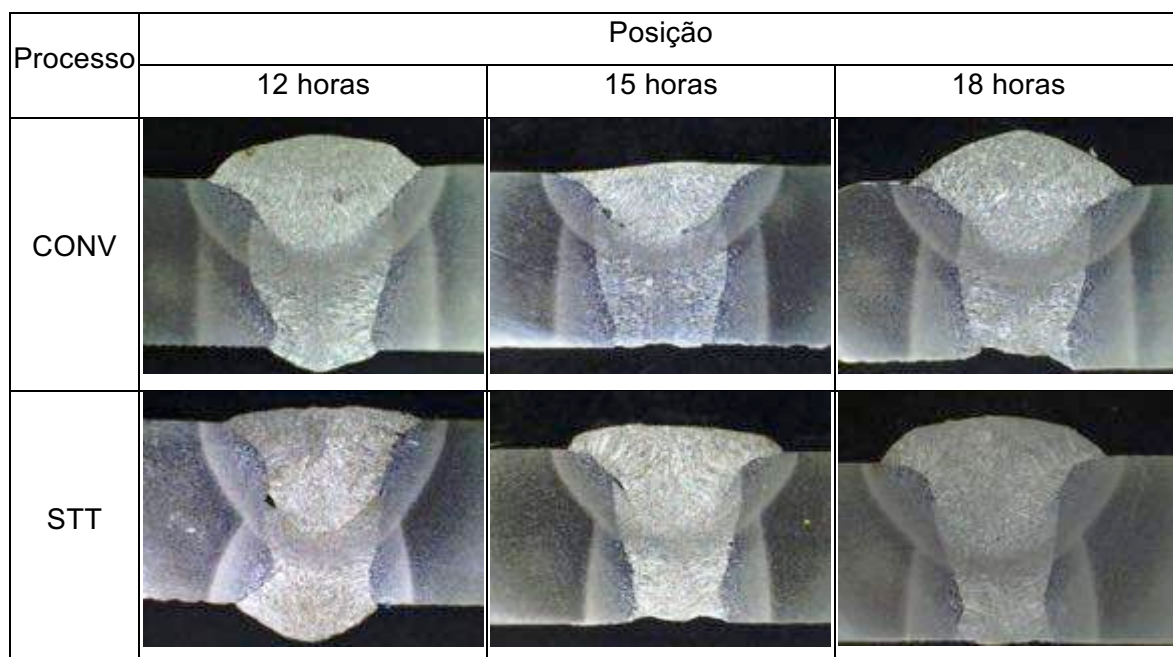


Figura 17. Macrografias dos cordões de solda (espessura da chapa: 8,0 mm) (SCOTTI, ET AL, 2013)

Costa (2011) ressalta que os cordões executados na progressão descendente apresentam uma tendência maior ao escorrimento do metal fundido e que para a progressão de soldagem ascendente ocorreram dificuldades para abertura e em manter o arco aberto no processo convencional, devido ao escorrimento da poça de fusão e perfuração da raiz.

Magalhães (2012) encontrou dificuldades na abertura do arco devido à perfuração da raiz na posição plana causada pela grande quantidade de energia imposta ao iniciar os

testes. Além do mais, na tentativa de encontrar o envelope operacional, perfurações e falta de penetração surgiram no passe de raiz nas posições verticais e sobrecabeça.

Aliado a estes fatos, outros fatores dificultam a soldagem fora de posição, dentre eles pode-se citar, a utilização de chanfro estreito (*narrow gap*) e a não utilização de cobre junta.

Para Vargas et al. (2011), do ponto de vista econômico a soldagem requer juntas menos volumosas, pois, reduz o tempo de soldagem, deposita menos material o que minimiza os custos em consumíveis, reduz as distorções pela redução do aporte térmico e etc. Por outro lado o menor volume disponível a ser preenchido pelo chanfro estreito limita as velocidades de alimentação pelo aumento da probabilidade de ocorrerem escorrimentos no passe de enchimento. Destacando-se que o ângulo frequentemente utilizado em soldagem é de 60°, o chanfro estreito utiliza ângulos de 2 - 15°.

De acordo com Vargas et al. (2011), uma das desvantagens de utilizar cobre junta se deve a possível contaminação do cobre na solda o que geraria uma subsequente corrosão no cordão do passe de raiz. Já a não utilização de cobre-junta dificulta a soldagem do passe de raiz, pois, aumenta a probabilidade de vazamento do metal fundido. Além do mais manter a separação entre as juntas constante é outro desafio.

Já para Magalhães (2012), na soldagem de meia cana em um tubo de 8", com um chanfro estreito, o arco tende a defletir para um dos lados (causando o defeito conhecido como *humping*), além da ocorrência de defeitos como falta de penetração.

E por fim, o passe de raiz é o primeiro a ser depositado na soldagem orbital, confere resistência da união, e geralmente é o passe mais crítico e difícil de realizar, pois, não se tem acesso interno ao duto, e caso ocorram defeitos de execução a remoção do material se torna mais difícil. Este passe deverá ainda ter uma espessura suficiente para garantir uma boa união dos tubos, e para que possa suportar o seguinte passe, passe de enchimento, sem furar (VARGAS ET AL, 2011).

Todos estes fatos demonstram a grande dificuldade da soldagem fora de posição utilizando um único conjunto de parâmetros.

### **2.3.3 Cálculo da frequência de oscilação da tocha**

Além do ajuste da relação  $V_a/V_s$  destacado no Item 4.2, a frequência de oscilação da tocha (Figura 18) também deve ser calculada durante o processo de execução da soldagem.

Magalhães et al. (2014) ressaltam que a utilização de tecimento permite uma maior velocidade de alimentação e de soldagem ampliando a produtividade. Além do mais, o uso

do tecimento minimiza o efeito do desvio do arco (*humping*), este que segundo Vargas et al. (2011), é um dos maiores problemas na soldagem de chanfro estreito.

De acordo com Magalhães (2012) a frequência “f” de oscilação da tocha é função da velocidade de soldagem ( $V_s$ ) e do comprimento de onda do tecimento ( $\lambda$ ) (Eq. 8).

$$f \text{ (Hz)} = \frac{V_s}{\lambda} \cdot \frac{10}{60} \quad (8)$$

Em trabalhos anteriores (COSTA, 2011 e MAGALHÃES, 2012), o valor do comprimento de onda ( $\lambda$ ) adotado foi de 1,6 mm, conforme recomendado pela norma AWS D10.12 (ANSI/AWS, 1989).

Deve-se ressaltar que a frequência de oscilação da tocha normalmente é limitada pelo sistema orbital mecanizado em função da amplitude de tecimento e velocidade de soldagem. Desta forma, se o resultado da Eq. 8 for maior que a frequência limite do equipamento, o valor limite disponibilizado pelo sistema de controle do equipamento deve ser adotado.

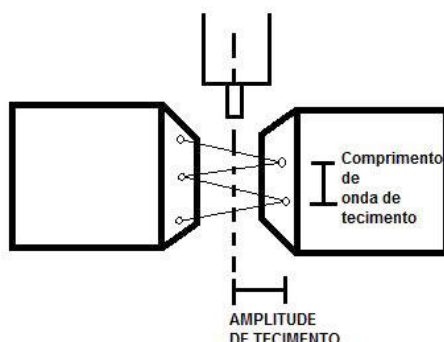


Figura 18. Esquema de oscilação da tocha representando a amplitude de tecimento e o comprimento de onda de tecimento

## 2.4 Considerações à norma API 1104 (2010)

Em função do grande uso da Norma API 1104 (2010) no presente trabalho, são apresentados a seguir os critérios de aceitabilidade segundo a norma para inspeção visual e ensaios destrutivos. É considerado um defeito se uma imperfeição (irregularidade ou descontinuidade detectada) tiver magnitude suficiente para justificar a rejeição com base nos critérios da Norma API 1104 (2010).

### 2.4.1 Inspeção visual

Para o cordão de solda a ser qualificado atender às exigências de uma inspeção visual, este deve estar livre de trincas e penetração inadequada. A profundidade máxima da mordedura na face da solda não deve ultrapassar 0,8 mm ou 12,5% da espessura da parede do tubo, o que for menor, e não deve haver mais do que 2". Assim, para o tubo teste de 8", não deve exceder a 0,8 mm. Além disto, não deve haver mais do que 50 mm de mordedura em um trecho de solda de 300 mm.

A falta de penetração, que é definida como preenchimento incompleto da raiz da solda, é considerada como defeito em juntas sem Hi/Low (desalinhamento) se uma indicação individual exceder 25 mm. Também é considerada como defeito, caso o somatório do comprimento total da falta de penetração for superior a 25 mm ou exceder 8% em uma solda contínua de 300 mm.

Para o caso em que a junta soldada possua Hi/Low, a falta de penetração deve ser considerada um defeito quando o comprimento da falta de penetração exceder 50 mm ou o somatório do comprimento total exceder 75 mm ao longo de solda contínua de 300 mm.

A falta de fusão e sobreposição, que são imperfeições superficiais entre o metal de solda e o metal de base e se estendem até a superfície da solda (raiz ou face), é considerada um defeito quando o comprimento de uma ocorrência de falta de fusão exceder a 25 mm ou o somatório de todas as ocorrências de falta de penetração exceder 25 mm ao longo em um cordão de solda com 300 mm. É considerado também um defeito se a falta de fusão exceder 8% do comprimento do cordão de solda em 300 mm.

A falta de fusão entre dois cordões de solda adjacentes ou entre o metal de solda e o metal de base deve ser considerado um defeito caso o comprimento de uma indicação individual exceder 50 mm ou o somatório das indicações em 300 mm de comprimento da solda for superior a 50 mm. É considerado também um defeito se o comprimento total de indicações ultrapassar os 8% do comprimento de solda.

A presença de qualquer tamanho de trinca deve ser considerada um defeito, exceto as localizadas no início ou no final do cordão de solda. Para as trincas localizadas no início ou fim da solda, a trinca será um defeito se superar o tamanho de 4 mm.

Para a presença de porosidade, definida como gás aprisionado por solidificação do metal de solda antes do gás ter a possibilidade de subir para a superfície da poça de fusão e de escape, no caso de um poro individual, este não pode exceder 3 mm.

De acordo com a API 1104 (2010) a concavidade no cordão de solda é aceitável para qualquer comprimento.

A Norma API 1104 (2010) ainda ressalta que o acúmulo de imperfeições, excluindo a falta de penetração na condição de Hi/Low, será considerado defeito de soldagem quando o comprimento total das imperfeições superar 50 mm ao longo de uma solda com 300 mm; ou quando o comprimento total das imperfeições exceder 8% do comprimento da solda. No caso da soldagem meia cana do tubo com 8", não deve exceder 25mm.

Para manter a qualidade da solda, o reforço para dentro do chanfro não deve ser maior que 1/16 de polegada (2 mm) acima do material de origem. O reforço exterior não deve ser maior que 1/8 de polegada (3 mm).

Como forma de resumir os valores apresentados, a Tabela 3 traduz as exigências da API 1104 (2010) para o duto em estudo.

Tabela 3. Critérios de aceitabilidade da API 1104 (2010) para duto de 8" de diâmetro

Imperfeição	Critério (Solda Recusada)
Mordedura (face da solda)	A profundidade máxima excede 0,8 mm.
Mordedura (face da solda)	Mais do que 50 mm de mordedura em um trecho de solda de 300 mm.
Falta de penetração (sem Hi/Low)	Indicação individual excede 25 mm.
Falta de penetração (sem Hi/Low)	O somatório do comprimento total da falta de penetração for superior a 25 mm em uma solda contínua de 300 mm
Falta de penetração (sem Hi/Low)	O somatório do comprimento total da falta de penetração for superior a 24 mm.
Falta de penetração (com Hi/Low)	O comprimento da falta de penetração exceder 50 mm ou o somatório do comprimento total exceder 75 mm ao longo de uma solda contínua de 300 mm
Falta de Fusão	O comprimento de uma indicação individual exceder 25 mm.
Falta de Fusão	O comprimento total de indicações em qualquer 300 mm de comprimento de solda exceder 25 mm.
Falta de Fusão	O somatório do comprimento total da falta de penetração for superior a 24 mm.
Falta de Fusão entre cordões	O comprimento de uma indicação individual exceder 50 mm.
Falta de Fusão entre cordões	O comprimento total das indicações em 300 mm do cordão de solda superar 50 mm.
Falta de Fusão entre cordões	O comprimento total de indicações ultrapassar 27 mm do comprimento da solda.
Concavidade na solda	Aceitável qualquer comprimento.
Trincas	Qualquer tamanho de trinca deve ser considerado um defeito, exceto as localizadas no início ou no final do cordão de solda.
Trincas	Para as trincas localizadas no início ou fim da solda, a trinca será um defeito se superar o tamanho de 4 mm.
Porosidade	A porosidade, no caso de um poro individual, exceder 3 mm na pior situação.
Inclusões de escória	Não é defeito e pode estar localizado em qualquer local do cordão.
Acúmulo de Imperfeições	O comprimento total das indicações em 300 mm de comprimento exceder 50 mm.
Acúmulo de Imperfeições	O comprimento total de indicações ultrapassar 27 mm do comprimento da solda.
Concavidade	Qualquer comprimento de concavidade é aceito, desde que não haja falta de penetração.

A Figura 19 ilustra os defeitos de soldagem supracitados neste subcapítulo para auxiliar na análise visual dos cordões de solda e nos exames por macrografia.

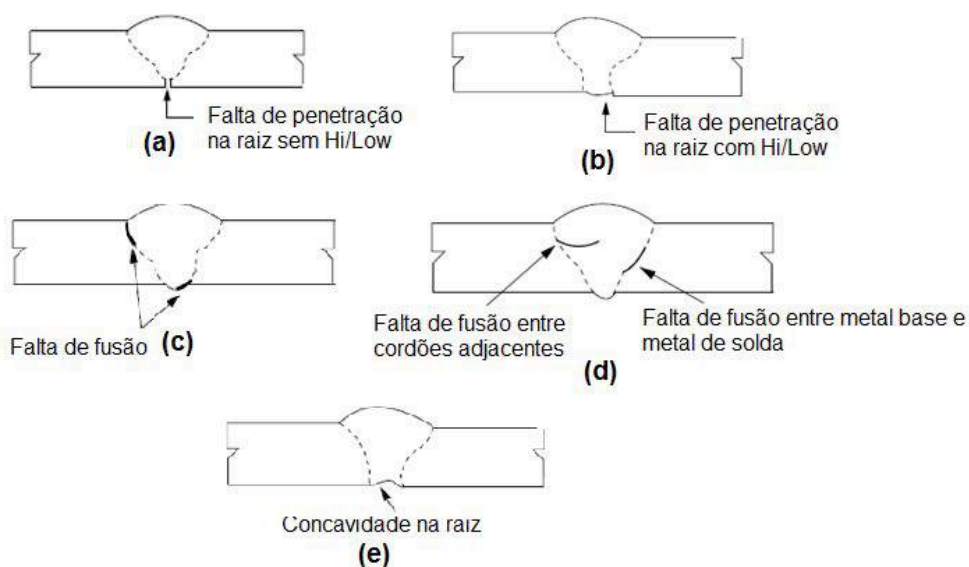


Figura 19. Representação dos defeitos (ADAPTADO DE API 1104, 2010)

## 2.4.2 Requisitos de qualificação para os ensaios destrutivos

Além dos ensaios visuais descritos anteriormente, é necessário avaliar a qualidade da junta soldada por meio de ensaios destrutivos, descritos a seguir.

### 2.4.2.1 Ensaio de tração

A resistência à tração da solda, incluindo a zona de fusão de cada amostra, deve ser maior ou igual à resistência à tração mínima especificada do material de tubo. Se a ruptura da amostra ocorrer fora da zona de fusão e atende aos requisitos mínimos de resistência à tração do material, a solda satisfaz os requisitos. Caso a ruptura da amostra for na zona de fusão e a força observada é maior ou igual à resistência à tração mínima especificada do material da tubulação, a solda será aceita e satisfaz os requisitos.

Os requisitos de possíveis porosidades encontradas, caso o rompimento ocorra na solda, também são aplicáveis conforme descrito nos critérios de aceitação do ensaio de nick-break (item 2.4.2.2).



#### 2.4.2.2 Ensaio de nick-break

De acordo com a API 1104 (2010), o metal exposto deverá estar completamente fundido a maior, sem falta de fusão e sem porosidades maiores que 1/16" (1,6 mm) em sua maior medida e a área combinada de todos os poros não poderá ultrapassar 2% da área da superfície exposta.

Inclusões de escória não excederão 1/32" (0,8 mm) em profundidade e não terão comprimento maior que 1/8" (3 mm) ou metade do valor da espessura, o que for menor. Deverá haver pelo menos 1/2" (13 mm) de separação entre inclusões de escória adjacentes. Esse critério de aceitabilidade também se aplica aos corpos de prova de tração.

A Figura 20 ilustra os conceitos de profundidade, comprimento e separação dos defeitos.

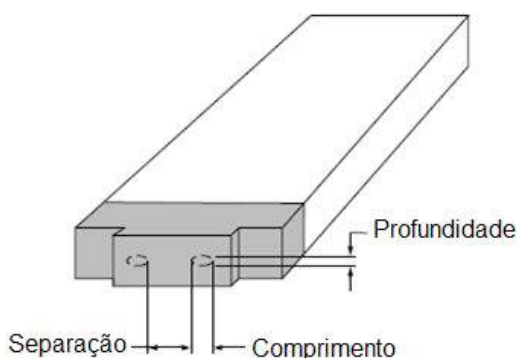


Figura 20. Representação das imperfeições do ensaio nick-break (ADAPTADO DE API 1104, 2010)

#### 2.4.2.3 Dobramento de face e raiz

O ensaio de dobramento deve ser considerado aceitável se nenhuma trinca ou outra imperfeição superior a 1/8" (3 mm) ou a metade da espessura nominal da parede, o que for menor, em qualquer direção, estiver presente na solda após a dobra. Portanto, será adotado aceitável imperfeições até 3 mm e que não seja trinca.

As trincas com origem a partir das bordas do corpo de prova ensaiado devem ser desconsideradas, a menos que evidenciem a presença de outras descontinuidades.

As trincas que se originam no raio exterior da curvatura ao longo das arestas do corpo de prova durante o teste e que estão a menos de 1/4" (6 mm), medida em qualquer direção, não deve ser considerada, a menos que sejam observadas as imperfeições óbvias.

#### 2.4.2.4 Ensaio de impacto charpy

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 corpo de prova de dimensões 10 x 10 x 55 mm (*full-size*). Como corpos de prova de dimensões 6,4 x 10 x 55 mm (*sub-size*) foram utilizados, deve-se fazer a 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.

De acordo com Scotti et al (2013), a temperatura do ensaio deve ser ajustada, uma vez que um corpo de prova 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 corpo de prova.

Para se calcular o valor da redução da temperatura, diferentes correlações são propostas pela literatura técnica, sendo que a correção apresentada na Eq. 9 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.

$$\Delta T = 51,4 \cdot \ln \left[ 2 \left( \frac{t}{10} \right)^{0,25} - 1 \right] \quad (9)$$

Neste caso, a temperatura originalmente proposta nesta pesquisa foi de 0 °C. Assim, o requerimento da energia de impacto é de 40 J @ 0 °C. Desta forma, para o corpo de prova *sub-size* de 6,4 mm, o requerimento é de 25,6 J @ -12,2 °C.

#### 2.4.2.5 Ensaio de dureza

De acordo com a norma API 1104 (2010), todos os valores são adequados se inferiores a 350 HV.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este trabalho tem como objetivo analisar a soldagem GMAW em dutos utilizando processos de soldagem GMAW com transferência metálica por curto-circuito em modo convencional ou natural (CONV) e controlado (processos derivativos) executadas por fonte comercial com tecnologia STT (*Surface Tension Transfer*) por meio do levantamento das condições paramétricas apropriadas sem a existência de defeitos, assim como ensaios mecânicos voltados para sua qualificação (tração uniaxial, dobramento de face e raiz, nick-break, impacto, macrografia, micrografia e microdureza).

As soldagens foram conduzidas em tubo API 5L X65, com diâmetro nominal de 8" e espessura de 8,0 mm, em progressão descendente e em dois passes (um de raiz e outro de enchimento/acabamento), com limpeza mecânica entre passes.

Verificou em testes iniciais que o sistema de movimentação da tocha (Tartílope V4) não estava funcionando adequadamente, apresentando falhas intermitentes (desligamento durante a execução das soldagens), defeito no sistema de ajuste automático da DBCP e no sistema de sincronização de disparo entre o Tartílope V4 e a fonte de soldagem. Assim, o primeiro passo deste trabalho foi assegurar o perfeito funcionamento dos equipamentos. Em seguida foi necessário verificar a influência dos elementos de fixação das juntas ("cachorros") no fluxo térmico próximo ao cordão de solda.

Em seguida, passou-se à preparação dos chanfros e retirada do revestimento do tubo teste. Após a confecção dos tubos testes, foi avaliada um valor inicial de referência durante as soldagens da frequência de tecimento e da quantidade necessária de material a ser depositado na junta para a realização do passe de raiz e enchimento.

Testes preliminares foram realizados para avaliar qualitativamente o decaimento de temperatura em ambos os lados das juntas soldadas motivado pelo excesso de falta de fusão lateral em outros projetos do grupo Laprosolda. Para tal, foram realizadas soldagens com um conjunto de parâmetros que apresentou descontinuidades, observando-se o regime térmico do processo por meio de termografia. Para esta avaliação térmica, as soldagens foram realizadas com duas montagens distintas, sendo uma delas com três tubos de teste (totalizando 4 passes de raiz e 4 passes de enchimento) e a outra com dois tubos teste

(totalizando 2 passes de raiz e 2 passes de enchimento). Posteriormente os arquivos de gravação originados pela câmera térmica foram analisados com o auxílio dos softwares Matlab® e OriginPRO®.

Após esses ensaios preliminares, foram investigados parâmetros de soldagem em dois passes (um de raiz e outro de enchimento/acabamento) mantendo a mesma quantidade de material depositado de forma a avaliar os processos GMAW com transferência por curto-circuito em modo convencional e derivativo (STT).

Neste contexto, a condução experimental do presente trabalho foi fundamentada nas seguintes etapas:

- Realização de testes preliminares para avaliar qualitativamente o decaimento de temperatura nos lados da junta;
- Realização de testes preliminares na soldagem de dutos utilizando parâmetros já qualificados na literatura para o passe de raiz;
- Análise visual para avaliar a qualidade superficial dos cordões;
- Realização de macrografias para verificar e avaliar possíveis descontinuidades internas dos cordões selecionados na etapa anterior;
- Realização ensaios mecânicos de tração, dobramento de face, dobramento de raiz, charpy, perfil de dureza e nick-break para qualificar os processos de soldagem;

### **3.1 Bancada experimental**

A bancada experimental montada para a execução dos testes é apresentada na Figura 21 e os principais equipamentos listados em seguida. A montagem da bancada na mesa posicionadora, as instalações elétricas e os desenvolvimentos eletrônicos, este último apresentado no Item 4.1, são escopo deste trabalho.

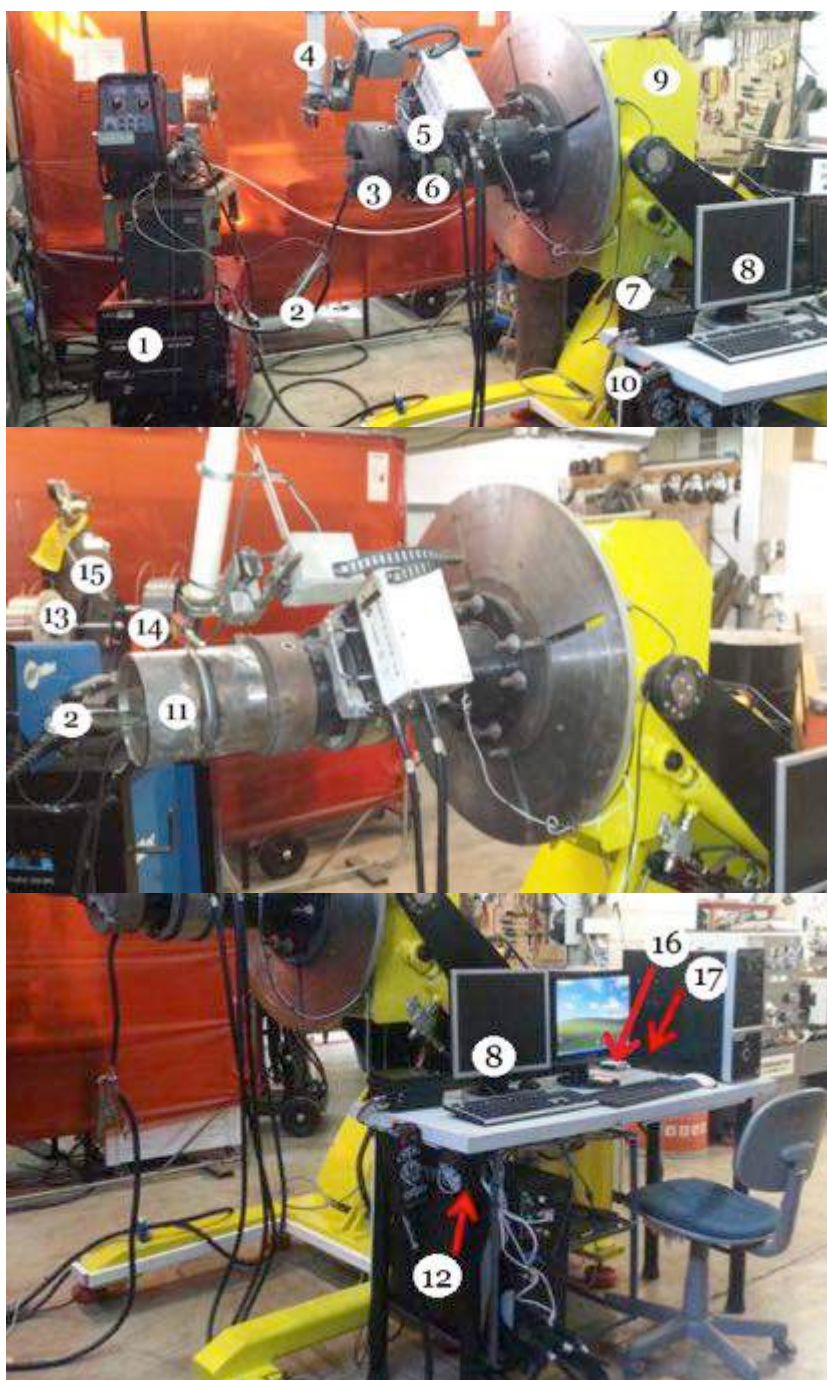


Figura 21. Bancada experimental utilizada, sendo 1. Fonte de soldagem; 2. Cabo terra da fonte de soldagem (aterramento em ambos os lados do tubo); 3. Suporte do tubo teste ("castanha"); 4. Tocha de soldagem; 5. Carrinho de movimentação da tocha (Tartilope V4); 6. Cinta de suporte para movimentação angular do carrinho. 7. Sistema de controle de ajuste automático da DBCP; 8. Monitor de visualização dos parâmetros de movimentação da tocha; 9. Mesa posicionadora; 10. Controle manual de manipulação da tocha; 11. Tubo teste; 12. Sistema de controle do manipulador da tocha (Tartilope); 13. Arame ER70S-6 com 1,2 mm de diâmetro; 14. Sensor *laser*; 15. Cilindro de gás; 16. Placa de aquisição (National Instruments modelo NI USB-6009); 17. Sistema de aquisição de dados

### 3.1.1 Fonte de soldagem para curto-circuito convencional

Para a execução do processo GMAW curto-circuito convencional, utilizou-se a fonte de soldagem multiprocessos modelo PipePro 450 RFC 2010 do fabricante Miller Electric, apresentada na Figura 22. Esta fonte é composta por dois cabeçotes alimentadores de arame *PipePro Dual DX* da própria fabricante. Em seguida são descritos os dados de manual para a fonte PipePro 450 RFC, segundo Segundo Miller (2010).

- Faixa de corrente (modo CC): 5 a 600 A;
- Faixa de tensão: 10 a 44 V;
- Corrente Nominal: 450 A @ 100%;
- Tensão nominal: 44 V @ 100%;
- Tensão em vazio: 80 V.



Figura 22. Fontes de soldagem utilizada: PipePro 450 RFC

Para a obtenção do modo de transferência por curto-circuito convencional, foi selecionado no painel de controle da fonte o programa “MIG” tipo de arame-eletrodo “Steel” da série “E70” (aço carbono da série E70), com diâmetro “0.045 in” (1,2 mm), gás de proteção “C25” (Ar+25% CO<sub>2</sub>).



### 3.1.2 Fonte de soldagem para curto-circuito controlado (STT)

Para a execução do processo GMAW curto-circuito-controlado STT, utilizou-se fonte de soldagem eletrônica inversora de multiprocessos da fabricante Lincoln Electric de modelo Power Wave 450/STT, apresentada na Figura 23. A fonte é composta de arame Power Feed 10M da própria fabricante. Em seguida são descritos os dados de manual para a fonte Power Wave 450/STT, segundo Lincoln Electric (2014).

- Faixa de corrente: 5 a 570 A;
- Faixa de tensão: 10 a 43 V;
- Fator de trabalho: 60%;
- Corrente nominal máxima de trabalho: 450 A @ 100%;
- Tensão máxima de trabalho: 38 V @ 100%.



Figura 23. Fontes de soldagem utilizada: Power Wave 450/STT

Para se obter este modo de transferência por curto-circuito controlado, foi selecionado no painel de controle o programa de número 25, onde são ajustadas a velocidade de alimentação, a corrente de base, a corrente de pico e o *Tail-out*. O parâmetro “Burnback Time”, que evita do arame colar no cordão de solda ao término do processo, foi ajustado em 0,03 segundos.

### 3.1.3 Execução das soldagens

As soldagens GMAW com transferência metálica por curto-circuito em modo convencional (natural) e controlado (processos derivativos) utilizando-se fonte comercial (STT) foram conduzidas de forma mecanizada, executadas em progressão descendente e em dois passes (um de raiz e outro de enchimento/acabamento).

A realização dos passes em progressão descendente é feita em duas etapas. A primeira começa no ponto mais alto do tubo, às 12 horas ( $0^\circ$ ), passando pela posição vertical às 15 horas ( $90^\circ$ ) e termina no ponto mais baixo, às 6 horas ( $180^\circ$ ), por um lado, conforme anteriormente apresentado na Figura 16. A segunda etapa do processo começa novamente às 12 horas e o cordão é depositado em volta do outro lado do tubo até se encontrar com o primeiro cordão, às 6 horas. Cada etapa soldada é denominada de meia cana, conforme apresentado na Figura 24.

O passe de raiz é o primeiro a ser depositado na soldagem orbital e geralmente é o passe mais crítico e difícil de realizar, segundo Vargas et al. (2011). Após a execução do passe de raiz é necessário aguardar que o tubo teste entre em equilíbrio térmico com o ambiente para realização do passe de enchimento. O tempo entre passes é de aproximadamente 30 minutos. Além disso, deve-se remover a escória e possíveis óxidos formados durante o período de esfriamento do duto. Para tanto, optou-se por escovar o cordão de solda entre passes com escova de aço (modelo EN 1083 para 9000 rpm) acoplada em uma esmerilhadeira. Para silicatos que por ventura não puderam ser removidos, devido estarem fortemente aderidos ao metal de base, utilizou-se de picadeira.

Ao final da soldagem do passe de raiz mensura-se a distância entre a superfície da raiz e a superfície da face do duto. Este valor servirá de entrada para o cálculo da velocidade de soldagem a ser utilizada no passe de enchimento. É analisado também se houve penetração na raiz conforme norma API 1104 (2010).

Ao final do passe de enchimento mensura-se o reforço e a largura de face em todas as posições (plana, vertical e sobrecabeça) com gabaritos para verificar a conformidade exigida pela norma API 1104 (2010) e, logo após o cordão deve ser cuidadosamente escovado.

Durante a execução dos passes de solda, o operador deve acompanhar atentamente as variações da DBCP e de percurso do arame na junta e efetuar em tempo real correções no controle manual do Tartilope V4, que é o sistema de deslocamento utilizado para a tocha. Estas correções são de extrema importância, uma vez que, a DBCP não se mantém constante devido ao desvio de circularidade do tubo (caso o controle automático esteja desabilitado) e da ponta do arame não se manter no centro da junta durante o percurso. Em



alguns casos, como por exemplo na soldagem do passe de raiz para processo convencional, é preciso desviar o arame para a lateral do chanfro evitando a perfuração da raiz e consequentemente o apagamento do arco.

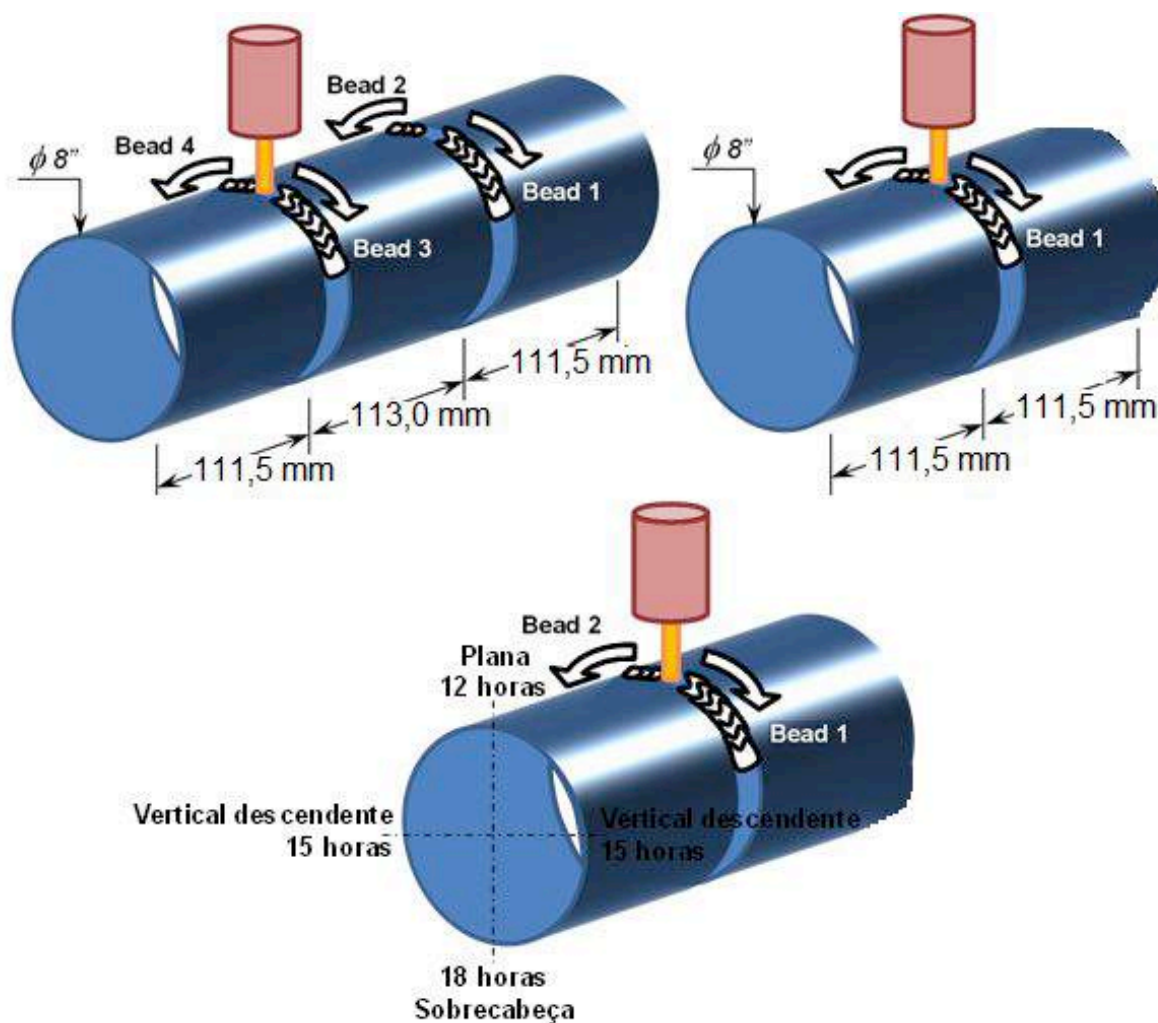


Figura 24. Esquema de execução das soldagens (progressão descendente na posição 5G)

A operação detalhada para a execução da soldagem em conjunto com a manipulação da bancada é descrita na Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6.

Após as soldagens, a partir da delimitação dos parâmetros para cada um dos processos, retirou-se corpos de prova para ensaios mecânicos de diferentes cordões de solda obtidos (no mínimo quatro cordões, ou seja, quatro meias canas, totalizando duas soldas completas em 360° nos tubos).

Tabela 4. Checklist de preparação inicial para a execução da soldagem

Preparação Inicial	
1	Retirar todo o revestimento do tubo de modo a não interferir no ajuste do sensor <i>laser</i> , na execução da soldagem e geração de porosidades.
2	Unir cada manga do duto por meio de perfil L de 1" ("cachorros") utilizando "ponteamento" de solda. Alinhar a junta utilizando a cinta projetada e gabaritos.
3	Verificar se o rolete é o ideal para o arame-eletrodo AWS ER70S-6 com 1,2 mm de diâmetro. Para determinar a correta pressão de alimentação do arame, é preciso certificar-se de que o arame se desloca sem problemas através do tubo-guia. Em seguida, deve-se definir a pressão dos roletes. Para isso, é preciso alimentar o arame para fora da pistola contra um objeto isolado, neste caso, sem a presença do tubo teste na "castanha".
4	Posicione a ponta do arame há 2 mm para fora da pistola.
5	Verificar o "cast" na ponta do arame, o mesmo deve estar envergando a favor de segurar a poça de fusão.
6	Soltar os roletes da fonte de soldagem de forma que ao acionar a fonte de soldagem por acidente o mesmo não alimente o arame.
7	Ajustar e verificar a vazão do gás na saída do bocal com bibímetro.
8	Verificar se o arame que está instalado na máquina de soldagem é o correto
9	Verificar se o arame é suficiente para a execução de 1 meia cana.
10	Verificar o desgaste e/ou excesso de respingo de solda no bocal.
11	Verificar o aperto do bocal da tocha de soldagem.
12	Posicionar do tubo teste na castanha.
13	Verificar a inclinação da mesa posicionadora com o auxílio do nível. Para tal, deve-se posicionar o nível sobre o tubo teste e mover a mesa posicionadora de forma que a inclinação do tubo seja zero.
14	Limpar e escovar as juntas.
15	Verificar se o cabo de controle "disparo Tartílope" está conectado corretamente na fonte de soldagem.
16	Conectar cabo terra da fonte no duto.
17	Conectar o cabo terra de controle da fonte de soldagem no duto (se houver).
18	Ajustar a inclinação da tocha de soldagem.
19	Parametrizar a fonte de soldagem, lembrando-se de parametrizar o tempo entre disparo da fonte de tensão e carrinho de no mínimo 0,01 segundos, caso contrário a fonte não dispara.
20	Desacionar o botão de emergência no controle manual.
21	Verificar se o led verde (liga) do Tartílope V4 está ligado. Se não estiver ligado verificar se o Tartílope V4 está com as chaves fim de curso acionadas (botão branco aceso). Se as chaves fim de curso estiverem ligadas, movimentar o Tartílope (eixos x,y,z ou A) até a luz branca apagar. Caso o Tartílope V4 persista não ligar pressionar em sequência o botão branco (liberar curso), o botão verde (liga) mantendo pressionado o botão branco, o botão vermelho (desliga) mantendo pressionado o botão verde e vermelho. Em seguida liberar o botão vermelho (desliga) e verificar se o botão verde (liga) acende o led habilitando o Tartílope V4 para funcionamento.
22	Parametrizar o Tartílope V4. Sempre parametrizar o Tartílope após acionar o botão "Liga" (verde) do Tartílope V4.
23	Verificar o aperto das borboletas do carrinho, as mesmas devem estar bem fixas. Movimentar o Tartílope V4 utilizando o controle manual verificando se o carrinho não agarra em todas as posições ou desliza na posição vertical*.
24	Limpar o bocal (retirar respingos).
25	Ajustar a tocha no ponto de início de soldagem.
26	Apertar os roletes da fonte de soldagem de forma a tensionar o arame.
27	Desacionar o botão no controle manual "Disparo Tartílope" e alimentar arame.
28	Cortar a ponta do arame.
29	Posicionar o componente que auxilia na abertura do arco no centro da junta ou dobrar a ponta do arame 90 graus.

\* Caso o carrinho estiver pressionando a cinta com muita força o Tartílope V4 poderá desligar durante a soldagem, pois, o driver não possui corrente suficiente para suprir a carga demandada. Portanto, deve-se calibrar a pressão entre o carrinho e a cinta realizando simulações até a calibração correta. Após calibrar, executar soldagens preliminares.

Tabela 4. Checklist de preparação inicial para a execução da soldagem (continuação)

Preparação Inicial	
30	Instalar a fita que auxilia no controle da DBCP sobre o tubo. Para a soldagem do processo convencional posicionar no mínimo a 30 mm do chanfro para execução do passe de enchimento.
31	Ligar o <i>laser</i> que faz parte do circuito de controle da DBCP.
32	Se o feixe de <i>LASER</i> estiver fosco sobre o tubo, limpar visor do sensor.
33	Ajustar o feixe de <i>LASER</i> de forma a caminhar paralelamente com a ponta do arame.
34	Acionar o controle da DBCP utilizando o botão vermelho localizado atrás do controle manual.
35	Ajustar a DBCP utilizando gabaritos e os botões Z+ e Z- do controle manual para chegar em uma altura acima da DBCP desejada e setar a posição utilizando o botão preto localizado atrás do controle manual (controle de ajuste da DBCP). Obs.: Caso deseje desligar o controle da DBCP durante a execução da solda, utilizar o botão de cor vermelha.
36	Ajustar a ponta do arame no centro da junta a ser soldada.
37	Movimentar o Tartilope V4 utilizando o controle manual e verificar se o mesmo não desliga em alguma posição da meia cana. Se desligar posicionar o cabo do sensor <i>LASER</i> (controle da DBCP) de modo a não passar próximo aos cabos de força de alimentação do carrinho do Tartilope V4.
38	Ajustar o tempo de aquisição no computador.
39	Purgar o gás verificando o valor da vazão no mostrador do cilindro.
40	Travar os roletes.
41	Conferir novamente a parametrização da fonte de soldagem
42	Conferir se o controle da DBCP está atuando pressionado os botões Z+ e Z-.
43	Verificar se está equipado com todas as EPI's necessárias para a execução da solda (mascara, luvas, avental, botina e etc.)
44	Pressionar o botão "Dispara Fonte" no controle manual.
45	Pressionar o botão "Dispara Tartilope" no controle manual (início da solda).

Tabela 5. Checklist pós soldagem

Pós soldagem	
1	Parar a soldagem pressionando o botão de "emergência" ou o botão "Dispara Tartilope" no controle manual.
2	Desligar o botão "reset" do controle da DBCP atrás do controle manual (botão vermelho).
3	Desacionar o botão "Dispara Tartilope" no controle manual.
4	Desacionar o botão "Disparar Fonte" no controle manual.
5	Desacionar o botão de "emergência" no controle manual.
6	Salvar os dados (arquivo .txt gerado pelo software LabView) no computador de aquisição.
7	Desconectar no duto o cabo terra da fonte de soldagem.
8	Desconectar no duto o terra de controle da fonte de soldagem (se houver).
9	Desengatar os roletes na fonte de soldagem.
10	Antes de retirar o duto desligar o <i>laser</i> que auxilia no controle da DBCP para que o eixo "y" não se movimente e acione a chave fim de curso (passo importante).
11	Documentar a solda. Para o passe de raiz deve-se mensurar a distância entre a superfície da raiz e a superfície da face do tubo.
12	Para a execução do passe de acabamento/enchimento aguardar o duto entrar em equilíbrio térmico com o ambiente após o passe de enchimento (aproximadamente 30 minutos).

Tabela 6. Checklist para a execução do passe de enchimento

<b>Passe de Enchimento (Complementar)</b>	
1	Limpar o passe de raiz com escova de aço.
2	Executar a soldagem conforme procedimentos das Tabelas 4 e 5.
3	Retirar as escórias(silicatos) do tubo com esmerilhadeira (recomendado escova de aço); se necessário utilizar a picadeira.
4	Não é recomendado a utilização do controle da DBCP na execução do passe de enchimento.

### 3.1.4 Planificação de imagens (registro da solda)

Sendo os cordões de solda circulares (meia cana de tubulação) e concordantes com a superfície do tubo, a visualização dos perfis de solda poderia ser realizada registrando várias fotos igualmente espaçadas ao redor do tubo, mas este procedimento dificulta a distinção de início e fim das posições de soldagem (plana, vertical e sobrecabeça) pelo leitor, além de serem geradas um grande volume de fotos separadamente.

Portanto, foi desenvolvido uma técnica que consiste na geração de imagens planificadas do perfil de solda, concentrando as três posições de soldagem em uma única imagem, facilitando assim a visualização do perfil do cordão de solda e consequentemente a diminuição do volume de imagens apresentadas.

Para a geração das imagens planificadas, primeiramente é necessário filmar os cordões de solda produzidos. Para tal, a tubulação contendo a solda é fixada em uma mesa posicionadora ajustada na posição horizontal (Figura 25). A mesa posicionadora tem como função girar o tubo teste em velocidade constante durante as filmagens.

A velocidade de giro do tubo foi determinada em 1,713 cm/s e calculada com base no tempo mínimo de filmagem (velocidade máxima da mesa posicionadora). A velocidade é dada pela divisão numérica entre o comprimento da circunferência externa da tubulação (aproximadamente 69 cm) e o tempo em que a tubulação gasta para dar uma volta completa (40,28 s).

Para a geração das filmagens é importante certificar que a tubulação está centralizada no display da máquina fotográfica e que a câmera fotográfica e a mesa posicionadora estejam niveladas. Este ajuste é importante para não causar a sobreposição de partes dos cordões de solda na montagem final.



Figura 25. Detalhes do posicionamento dos equipamentos para a filmagem dos cordões de solda produzidos

As gravações foram realizadas com ajuste do zoom manual de 70 vezes para o passe de enchimento e de 100 vezes para a filmagem do passe de raiz.

Após a geração das filmagens (em formato “mov”) utilizou-se o software VideoMach® 9.5 para converter a filmagem em vários quadros no formato de imagem “jpeg” e o Adobe Photoshop® para unir essas imagens.

O Apêndice VII descreve o procedimento de planificação das imagens pós filmagens. O resultado da planificação do cordão de solda pode ser visualizado na Figura 26.



Figura 26. Imagem final do cordão de solda planificado (cordão de solda STT1)

## 3.2 Materiais

### 3.2.1 Metal de base

O material de base utilizado foi doado ao grupo Laprosolda-UFU com a especificação de aço carbono API 5L X65 com 8,0 mm de espessura e diâmetro interno de 8". Os tubos foram chanfrados, com a geometria mostrada na Figura 34. A preparação do chanfro dos dutos de teste foi realizada em torno mecânico. 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 7. Além disso, a soma de nióbio, vanádio, titânio e conteúdo não deve ultrapassar 0,15%.

Tabela 7. 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

O Laboratório de Soldagem (Laprosolda-UFU) realizou a análise química do metal de base utilizado nesta pesquisa. Portanto, a análise química não é escopo desta pesquisa e a mesma pode ser visualizada na Tabela 8. 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 7 e Tabela 8.

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

Tabela 8. Composição química do metal de base recebido e utilizado

Amostra	
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

### 3.2.2 Metal de adição

Para a investigação dos parâmetros por meio de soldagem foi utilizado como metal de adição o arame-eletrodo AWS ER70S-6 com 1,2 mm de diâmetro. A escolha do tipo e diâmetro do eletrodo está relacionada pelo fato de já existirem trabalhos anteriores com esse tipo de arame e que foi aplicado aos processos GMAW curto-circuito convencional e controlado (COSTA, 2011 e SCOTTI ET AL, 2013), servindo de comparação, e pelo fato de que esse arame possui diâmetro suficiente para se movimentar com folga na configuração do chanfro selecionado e por depositar material em grande volume, com o intuito de aumentar a produtividade, mas que não preencha totalmente a junta durante o passe de raiz. A composição química do arame-eletrodo utilizado é apresentada na Tabela 9 e suas propriedades mecânicas são apresentados na Tabela 10.

Tabela 9. Composição química nominal do arame AWS ER70S-6 (BELGO, 2013)

Elementos	Composição Química (%)
C	0,06 a 0,15
P	0,025 (máximo)
Cu	0,50 (máximo)
S	0,035 (máximo)
Mn	1,40 a 1,85
Si	0,8 a 1,15

Tabela 10. Propriedades Mecânicas do arame AWS ER70S-6 (BELGO, 2013)

Resistência à tração (MPa)	Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Resistência ao impacto (Já - 20°C)
480	400	22	27

### 3.2.3 Gás de proteção

A seleção do gás de proteção deve-se a trabalhos anteriores existentes e que foram aplicados a mesma junta proposta e com material de adição ER70S-6 de diâmetro de 1,2mm. Magalhães (2012) e Scotti et al. (2013) avaliaram dois tipos de gás de proteção: CO<sub>2</sub> puro e Ar+25%CO<sub>2</sub>. Em testes preliminares desses autores 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.

Dessa forma, a mistura Ar+25%CO<sub>2</sub> será a utilizada neste trabalho. A composição do gás foi testada por um analisador de gás, denominado de Oxybaby O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>, comprovando o teor de composição do gás dentro da faixa especificada (conforme apresentado no Item 2.1).

### 3.2.4 Sistema de aquisição de tensão e corrente

A aquisição de sinais de corrente e tensão de soldagem foram realizados por meio de transdutores de corrente do tipo hall envolvendo o cabo terra, divisor de tensão, sistema de condicionamento de sinais, placa de aquisição e *software* para o controle da aquisição. Esse sistema captura os dados durante a soldagem, registra-os em arquivos em forma de texto e apresenta ao operador em forma de gráficos ao término da aquisição.

O transdutor de corrente utilizado foi o de efeito Hall modelo HTA 600-S da marca LEM. Para o tratamento do sinal de corrente enviado pelo sensor de efeito Hall e da tensão de soldagem provindo da tocha foi utilizado um sistema condicionador de sinais (MACHADO, 2011; MOTA ET AL, 2011), implementado pelo Laprosolda (Figura 29b). A placa de aquisição é da fabricante National Instruments e modelo NI USB-6009 (Figura 29a). Este recebe os sinais provindos do condicionador de sinais e os registra conforme programado pelo software.

E por último, foi desenvolvido nesta pesquisa um software em linguagem de programação Labview® compatível com a placa NI USB-6215, cuja interface é mostrada na



Figura 27, que detecta o início do ensaio e dispara a aquisição automaticamente. A programação final pode ser vista no Apêndice III.

Os sinais são adquiridos por meio de frequência e tempos de aquisição pré-selecionados no ambiente do programa final. Todos os sinais foram adquiridos na frequência de 5 kHz a 13 bits e o tempo de aquisição é calculado, conforme Eq. 10, com base na velocidade de soldagem e no perímetro da metade do tubo.

$$\text{Tempo de aquisição (s)} = \frac{\text{perímetro do tubo (cm)}}{\text{velocidade de soldagem (cm/min)}} \times 60 \quad (10)$$

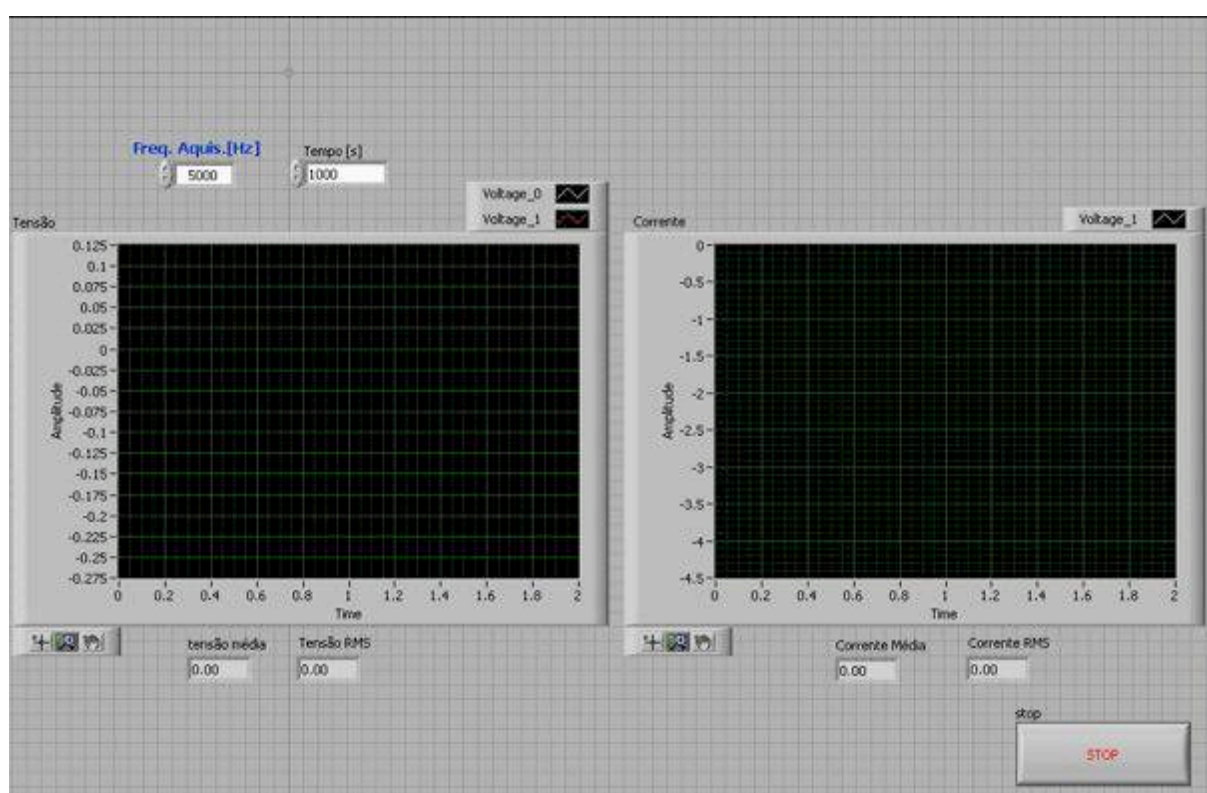


Figura 27. Interface final do programa

A geração dos oscilogramas por meio dos dados registrados em formato de texto foram realizados pelo software “OriginPro® 8.0” que permite abrir, manipular, sincronizar e tratar os dados gravados pelo programa de aquisição.

O processamento dos dados de corrente e tensão adquiridos foram manipulados com um programa desenvolvido pelo Laprosolda/UFU em linguagem Matlab® denominado de “Curto 3”.

O programa “Curto3” disponibiliza os resultados de corrente média, corrente eficaz (RMS), tensão média, tensão eficaz (RMS) entre outros. Para realizar os cálculos basta carregar o arquivo adquirido tipo texto, logo após selecionar a faixa de tempo desejada,

informar as colunas de corrente e tensão registradas no arquivo tipo texto, visualizar as faixas de corrente e tensão da faixa de tempo selecionada por meio de gráficos e por fim executar o cálculo. O software ambiente de manipulação dos dados pode ser visto no Anexo 1.



Figura 28. Detalhe de instalação do transdutor para medição de corrente - sensor Hall

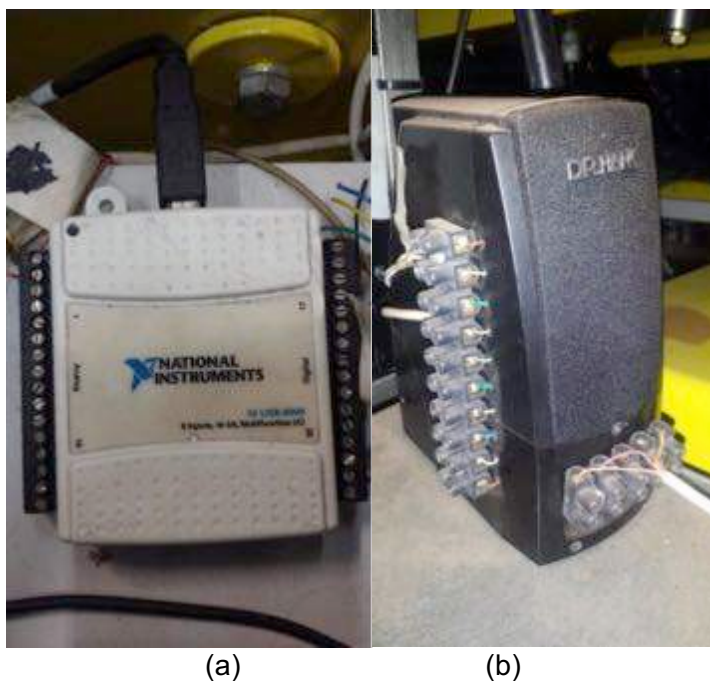


Figura 29. Sistema de aquisição de dados: (a) placa de aquisição modelo NI USB-6009; (b) condicionador de sinais

### 3.2.5 Manipulação do Tartílope V4

O Tartílope V4 foi projetado para ser aplicado na automação do processo de soldagem GMAW, em especial para a união de dutos, que abrange quatro posições diferentes de soldagem e no revestimento de tubos de caldeira. O Tartílope V4 é constituído basicamente por quatro módulos: o manipulador da tocha, o gabinete de controle, a interface homem-máquina e o controle de correção manual.

O controle de correção manual é utilizado para executar o rápido posicionamento do equipamento por intermédio dos botões que correspondem ao sentido positivo e negativo de cada eixo. Este também permite a inicialização do movimento do equipamento, com o botão “Disparo Tartílope” e o disparo da fonte de soldagem, com o botão “Disparo Fonte”. Caso ocorra algum problema com o equipamento, o botão “Parada de emergência”, desabilita a potência e a fonte de soldagem (UFSC, 2010).

O gabinete de controle do Tartílope contém as placas eletrônicas de isolamento, acionamento e controle. O gabinete, o controle de correção manual e suas funções podem ser visualizadas na Figura 30.



Figura 30. Gabinete de controle do Tartílope; (a) Detalhes do gabinete controle do Tartílope V4 (ADAPTADO DE UFSC, 2010); (b) Controle de correção manual do Tartílope V4

O software da interface inicia com o botão de emergência acionado, para evitar que algum eixo do manipulador robótico se mova. Portanto, o primeiro passo ao manipular o equipamento é desacionar o botão de emergência. Além do desacionamento do botão “Dispara Tartilope”, o botão de emergência pode ser utilizado para finalizar a soldagem.

O ambiente de software para parametrizar o tecimento, velocidade de soldagem e pronto para início de soldagem são mostrados na Figura 31.

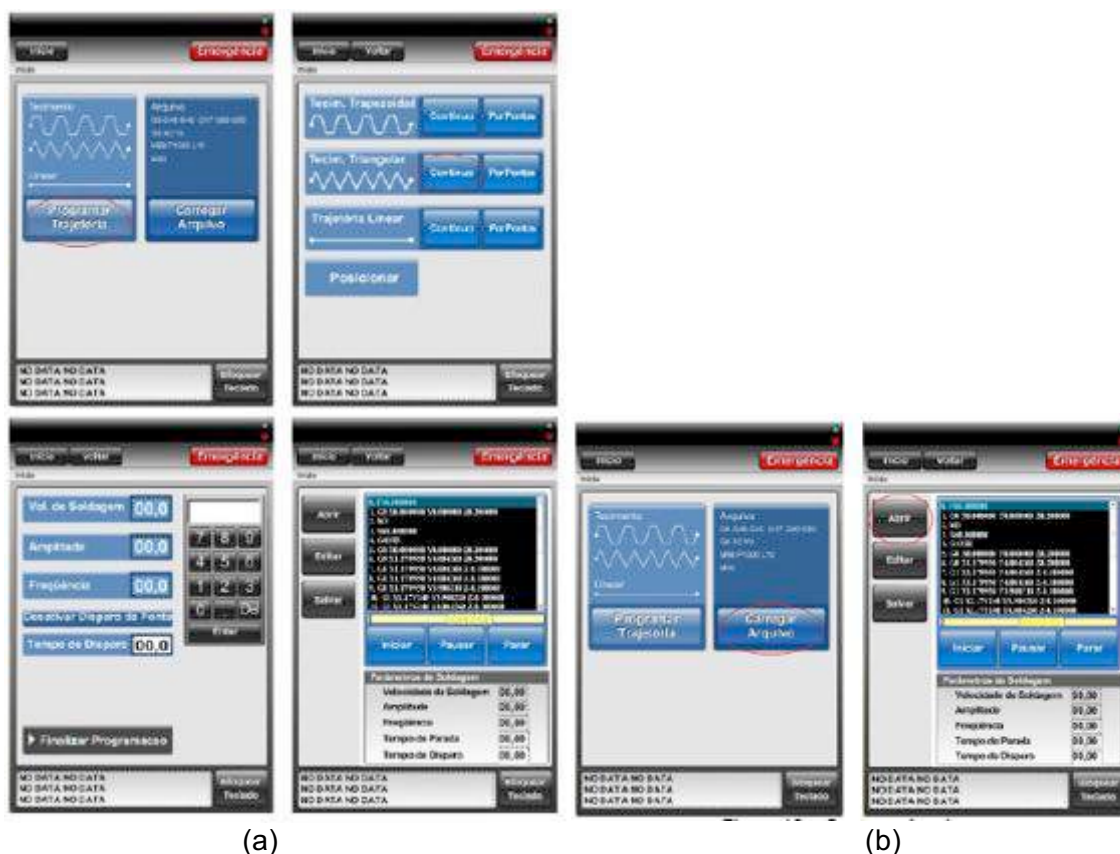


Figura 31. Programa ambiente de parametrização do Tartilope V4: (a) Tela de programação de tecimento e outros parâmetros; (b) Tela para carregamento dos parâmetros programados em (a) (ADAPTADO DE UFSC, 2010)

Para fins de padronização e entendimento, a Figura 32 convencionou os eixos manipulados pelo Tartilope V4. O eixo X corresponde ao deslocamento do carrinho sobre um trilho ou cinta, no sentido de soldagem. O eixo Y tem o papel de executar movimentos de tecimento de formas pré-definidas, podendo ser do tipo trapezoidal, triangular e linear. No equipamento utilizado não é possível realizar paradas nos extremos. O eixo Z é fundamentalmente utilizado para ajustar a distância entre a tocha e a peça. O eixo angular, designado como A, é o eixo rotacional que impõe o ângulo de ataque da tocha.



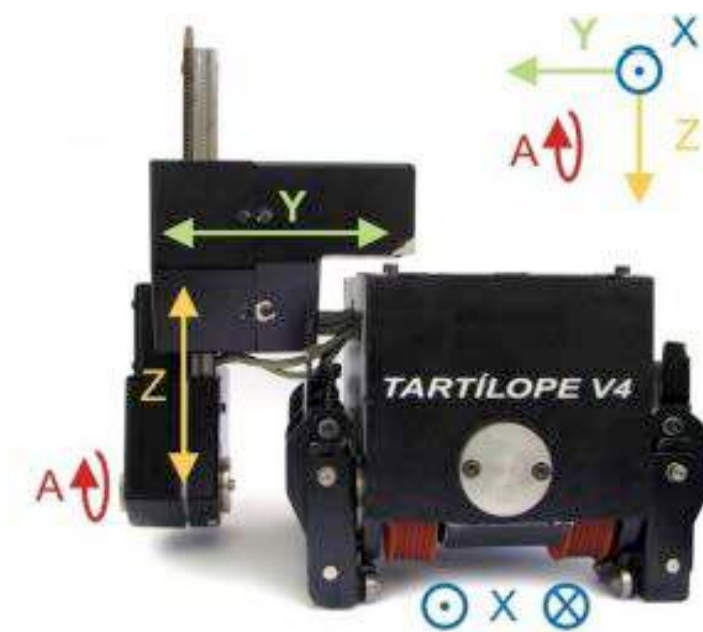


Figura 32. Padronização dos eixos (ADAPTADO DE UFSC, 2010)

### 3.2.6 Tocha

A tocha selecionada para execução dos testes foi a "*Narrow Gap Welding Torch for Automated Orbital Welding Systems*", da empresa SPA. Esta tocha não possui refrigeração e isso faz com que ela se torne leve (exerce uma força peso no manipulador do Tartilope de apenas 1,560 kgf, mesmo com o suporte feito em alumínio para ela mostrado na Figura 33a). O fato de não possuir refrigeração não é um empecilho, haja vista a baixa corrente utilizada nos modos de transferência por curto-circuito (MAGALHÃES, 2012).

Entretanto, neste trabalho necessitou da troca do prolongador fabricado de alumínio por um material de menor densidade devido à dificuldade de execução do tecimento ocasionada pelo empenamento do eixo "y" do Tartilope V4, principalmente ao passar pela posição vertical, desestabilizando a poça de fusão.

Dado a densidade do alumínio  $2697 \text{ kg/m}^3$ , escolheu-se substituí-lo pelo Policloreto de Vinila (PVC) de densidade  $1400 \text{ kg/m}^3$ , mantendo as mesmas dimensões do protótipo de alumínio. Após a substituição do material e exaustivos testes o eixo "y" não apresentou empenamentos. Os prolongadores e a modificação são mostrados em detalhes na Figura 33.

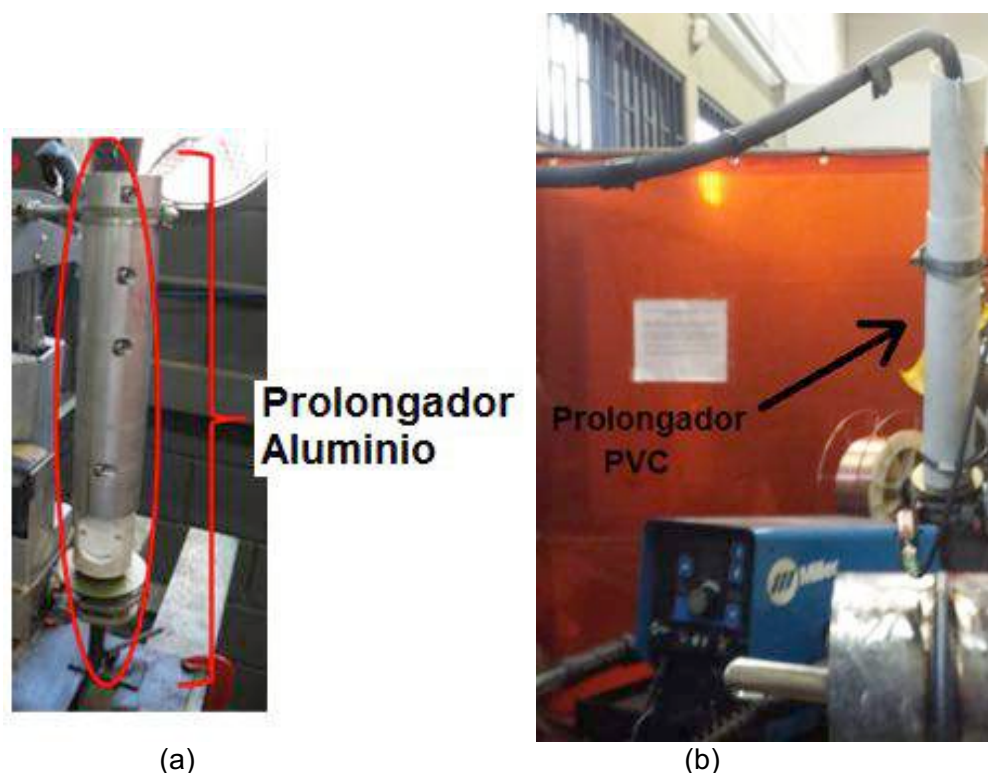


Figura 33. Detalhe dos prolongadores utilizados: (a) anterior (MAGALHÃES, 2012) e (b) modificado

### 3.2.7 Definição, fabricação dos chanfros e montagem da junta

A seleção do chanfro está associada a trabalhos anteriores (MAGALHÃES, 2012 e SCOTTI ET AL, 2013). A geometria do chanfro utilizada foi definida a partir de críticas providas de campo, da realidade de obras de construção e montagem de dutos de forma a reduzir a quantidade de material depositada e com o intuito de aumentar a produtividade.

Desta maneira, optou-se por estudar o perfil com bisel e chanfro adotado pelos autores mencionados, no qual utiliza a técnica de chanfro estreito (*narrow gap*) em “V” por ser de mais fácil preparação (em comparação à preparação em U, p.ex.) e ter um menor volume a ser preenchido (em comparação ao ângulo mínimo de 45° normalmente requerido para a soldagem GMAW, destacando-se que este ângulo é frequentemente ao redor de 60°).

Os dutos revestidos são recebidos com 12 m de comprimento e são cortados em tubos de 120 mm de comprimento, já considerando uma folga para usinagem do chanfro, sendo montados em conjunto de três ou em dois destes tubos em sequência para formar o duto teste. Com o conjunto de três tubos é possível realizar a soldagem de um total de quadro cordões de solda e com dois tubos um total de dois cordões de solda, pois estes são executados em meia canas. A configuração com dois tubos foi utilizada em testes

preliminares para análise do decaimento de temperatura e em soldagens para qualificação. A montagem dos tubos de teste seguiu o esquema apresentado na Figura 34.

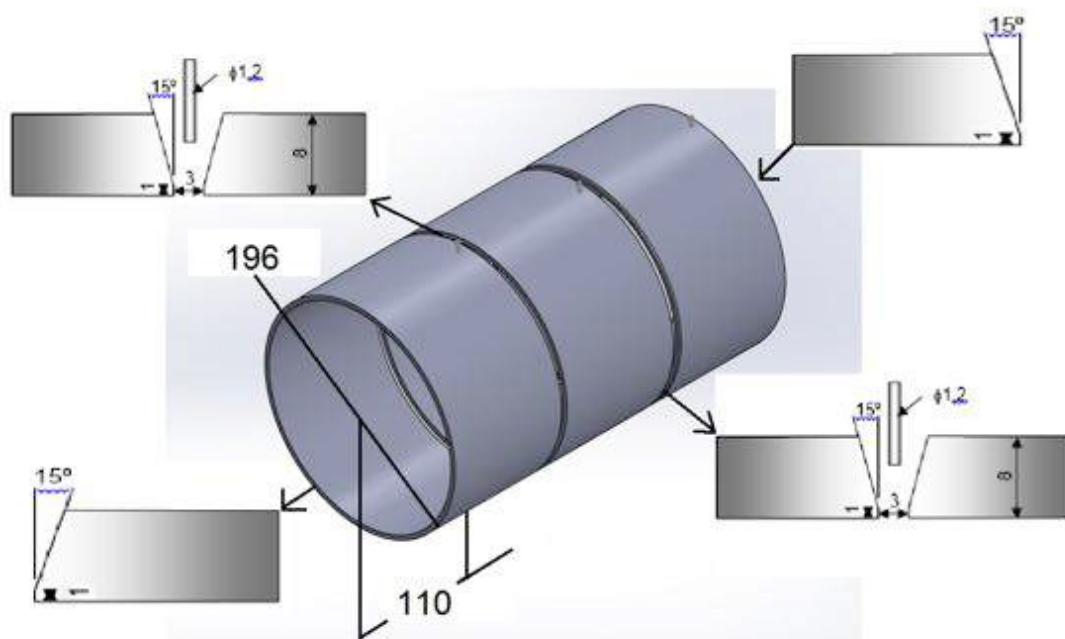


Figura 34. Esquema de montagem do tubo teste (unidades em mm)

Como sistema de fixação dos tubos, utilizou-se pequenos dispositivos (“cachorros”), com 15 mm de comprimento, fabricados a partir de cantoneiras de 1”x1/8”, posicionados em intervalos regulares internamente aos tubos para garantir que a junta não se altere ao longo da soldagem, conforme apresentada na Figura 35. A quantidade necessária de cachorros foi testada experimentalmente, sendo determinada em 6 unidades por junta. Segundo Magalhães (2012), a utilização dos cachorros é para garantir que a junta fique livre de obstruções de forma a não afetar o arco, como poderia ocorrer se fossem utilizados pontos de solda.



Figura 35. Detalhe do sistema de fixação dos tubos “cachorros”

Dada a grande quantidade de tubos testes necessários na realização dos ensaios optou-se por usar os chanfros e fixar o sistema de sustentação dos tubos (“cachorros”) por meio do ponteamto de solda na parte interna do duto e utilização de gabaritos desenvolvidos durante a realização deste trabalho.

Devido ao desvio de espessura e perpendicularidade dos tubos envolvidos, as superfícies internas da junta podem apresentar o desalinhamento ou Hi/Low na raiz durante a fixação dos tubos por “cachorros”.

Apesar de existir na prática um desvio de circularidade admissível na fabricação de cada seção de dutos postas por normas, como por exemplo a API 5L, nesta pesquisa limitou-se por soldagem sem desalinhamento (*misalignment*) ou (Hi/Low), para seguir as mesmas condições impostas por Scotti et al (2013).

É muito importante considerar que o desalinhamento é composto por diversos fatores (diferença de espessura, falha de circularidade, falha da perpendicularidade da seção, condição de acoplamento) que quando combinados resultam em uma medida final, que não deve exceder os limites definidos por norma (MAGALHÃES, 2012).

Pela Norma Petrobras N-464 (2014) e, em concordância com a API 5L (2012), no acoplamento de tubos de mesma espessura nominal, o desalinhamento máximo permitido é de 20% da espessura nominal, limitando-se a 1,6 mm. Já a API 1104 (2010) determina que esse deslocamento não deve exceder 1/8” (3 mm). Portanto, na fabricação dos dutos testes estas recomendações foram seguidas.

Durante a montagem dos tubos testes foram utilizados gabaritos de espessura 3 mm (chapas) para auxiliar como ajuste fino do espaçamento entre os chanfros e foi desenvolvido uma cinta para evitar a falha de paralelismo das seções dos tubos envolvidas, conforme visto na Figura 36.

A cinta desenvolvida foi fabricada por calandragem de chapa com dimensões 610 x 50 mm e 1/8” de espessura. Gabaritos triangulares localizados no centro da cinta, sendo no total 4 chapas de 3 mm espaçadas de 90 graus, com função de acomodar os tubos na posição vertical e auxiliar o ajuste do parâmetro de espaçamento entre os chanfros, foram fixados por solda. Com o auxílio de um parafuso a pressão é ajustada de maneira que as superfícies externas dos tubos se mantêm colineares durante o ponteamto dos “cachorros” por soldagem GMAW.





Figura 36. Ponteamento por solda dos cachorros: (a) detalhes dos gabaritos utilizados; (b) detalhe do parafuso utilizado para ajuste da pressão da cinta e do tubo contendo o revestimento

A fonte de soldagem de multiprocessos da fabricante Miller de modelo PipePro 450 RFC foi utilizada para pontear os “cachorros” por soldagem semiautomática. Como parâmetros usados durante a soldagem, utilizou-se o processo de soldagem convencional, arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro, velocidade de alimentação 3,5 m/min, tensão de 18,5 V, Indutância 40%, gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> com vazão de 15 l/min e ajustes da fonte com programa “MIG”, “STL”, “E70”, “size 0,045”.

De acordo com a API 1104 (2010) as superfícies a serem soldadas devem ser lisas, uniforme, livres de escória, graxa, tinta e outros materiais prejudiciais que possam afetar adversamente a soldagem. Nos ensaios de enchimento, notou-se a importância da retirada do revestimento. Caso contrário, há a geração de porosidades e perda de qualidade da junta soldada. Portanto, após a montagem do tubo testes é necessário a retirada do revestimento anticorrosivo que os envolvem.

Para minimizar o tempo de fabricação optou-se por retirar o revestimento com auxílio de uma lixadeira em conjunto com discos flap de 115 mm e Gr 40 para lixadeira, embora poderia ser retirado utilizando soluções químicas como por exemplo o Dioxano ou o Diclorometano. Os tubos testes finalizados podem ser visualizados na Figura 37.

Deve-se destacar que, para a execução do passe de enchimento, a retirada do revestimento é de suma importância. Caso contrário, há a geração de porosidades e perda de qualidade da junta soldada.



Figura 37. Tubos testes montados

### 3.3 Ensaios destrutivos

Antes de ser iniciada uma soldagem de produção em campo, o envelope ou parâmetros de soldagem devem ser qualificados para demonstrar que as soldas possuem propriedades mecânicas adequadas (tais como resistência, ductilidade e dureza). Segundo a norma API 1104 (2010), a qualidade das juntas deve ser determinada por ensaios destrutivos. Assim, neste item são apresentados os métodos utilizados nos ensaios destrutivos e a fabricação dos corpos de prova.

A Tabela 11 apresenta os ensaios mecânicos e quantidade de corpos de prova requeridos com base nos requisitos da API 1104 (2010). Os corpos de prova (CP) foram retirados dos dutos testes soldados conforme a mesma norma (Figura 38).

Tabela 11. Ensaios mecânicos executados e suas respectivas quantidades e localizações

<b>Ensaio</b>	<b>Quantidade de Corpos de Prova (CP)</b>
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

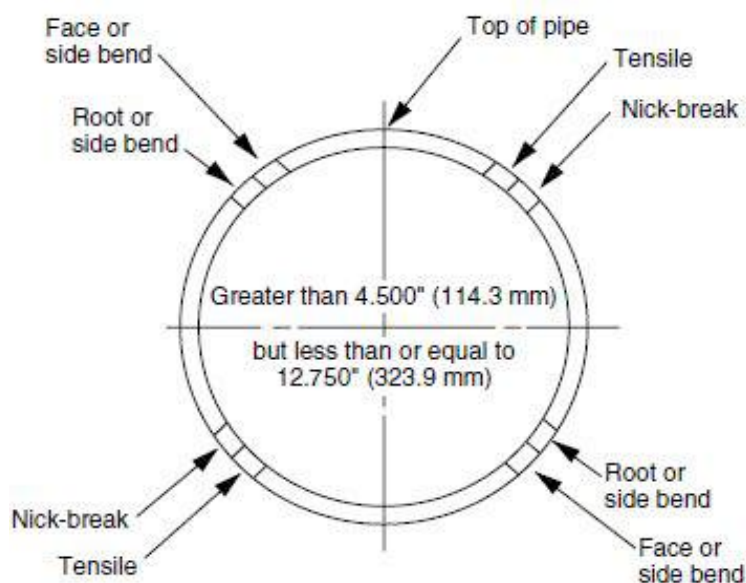


Figura 38. Posição de retirada dos corpos de prova (API 1104, 2010)

Conforme a API 1104 (2010) as amostras devem estar à temperatura ambiente antes do teste, exceto o ensaio de charpy, que deve ser resfriada a temperaturas abaixo de 0°C.

Para atender as dimensões mínimas estabelecidas pela API 1104 (2010), os corpos de prova foram extraídos dos dutos teste (posições planas, vertical e sobrecabeça), realizando cortes transversais com o auxílio de uma serra fita (Figura 39) e logo em seguida usinados por fresamento para atingir as dimensões requeridas, ou seja, trabalhadas de modo que os lados das amostras permaneçam lisas e paralelas.



Figura 39. Extração de corpos de prova do duto soldado

### 3.3.1 Fabricação de corpos de prova e método de ensaios

#### 3.3.1.1 Macrografia

Após a inspeção visual, os corpos de prova selecionados são examinados por meio da microscopia ótica e digitalizadas pelo próprio programa da câmera utilizada.

O ensaio de macrografia consiste na verificação a olho nu ou com uma ampliação de no máximo 10 vezes, de uma superfície plana, preparada adequadamente através de lixamento. A superfície é normalmente atacada por uma substância que reage com a superfície lixada e revela detalhes macrográficos da estrutura do material ou da junta soldada ensaiada (INFOSOLDA, 2014).

Nesta etapa os cordões de solda foram cortados transversalmente utilizando serra manual, embutidas em baquelite, lixadas (até lixa #1200) e atacadas com Nital a 2% (2% Ácido nítrico + 98% Álcool etílico) durante 40 segundos. Os corpos de prova foram cortados com pelo menos  $\frac{1}{2}$ " (13 mm) de largura em conformidade com a API 1104 (2010). A Figura 40 traz exemplos de corpos de prova cortados e embutidos.

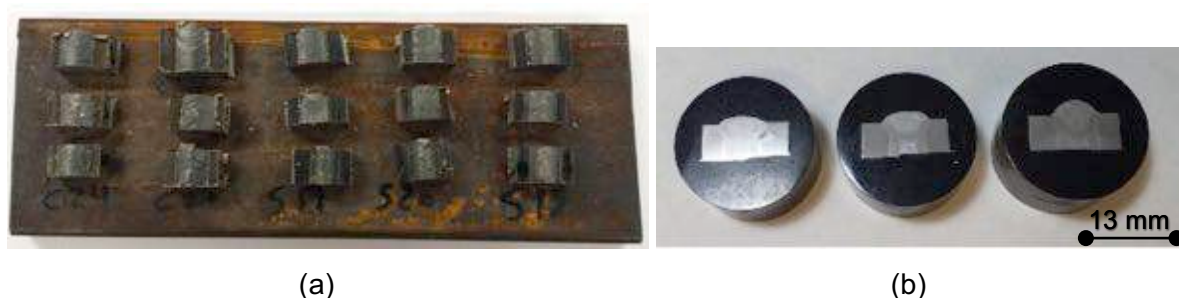


Figura 40. Corpos de prova para exame macrográfico: (a) Corpos de prova cortados por serra; (b) corpos de prova embutidas em baquelite

Em seguida, foram executados ensaios mecânicos (tração, dobramento, charpy, nick-break, perfil de dureza vickers) nos corpos de prova que não apresentaram nenhuma descontinuidade, imperfeições ou defeitos observados durante a análise macrográfica.

#### 3.3.1.2 Ensaio de tração

De acordo com a Norma API 1104 (2010), a força de tração é calculada dividindo a carga máxima no momento da falha pela menor área da secção transversal do corpo de prova.



Para os ensaios de tração uniaxial, utilizou-se máquina universal de ensaios instrumentada da marca Shimadzu, modelo Autograph AG-X (Figura 41), com capacidade de 300 kN, controlada por meio de software Trapezium X, do mesmo fabricante. A aplicação da força de tração sobre o corpo de prova deve ser uniforme e contínuo. O ensaio foi executado com velocidade constante de 5 mm/min.

A Norma API 1104 (2010) recomenda que os corpos de prova de resistência à tração sejam fabricados com aproximadamente as 9" (230 mm) de comprimento e cerca de 1" (25 mm) de largura (Figura 42a). Devido a limitações de dimensões do duto as amostras foram fabricadas com 223 mm de comprimento (Figura 42b). As amostras foram fresadas para obter lados lisos e paralelos e, o reforço não deve ser removido em ambos os lados do corpo de prova.

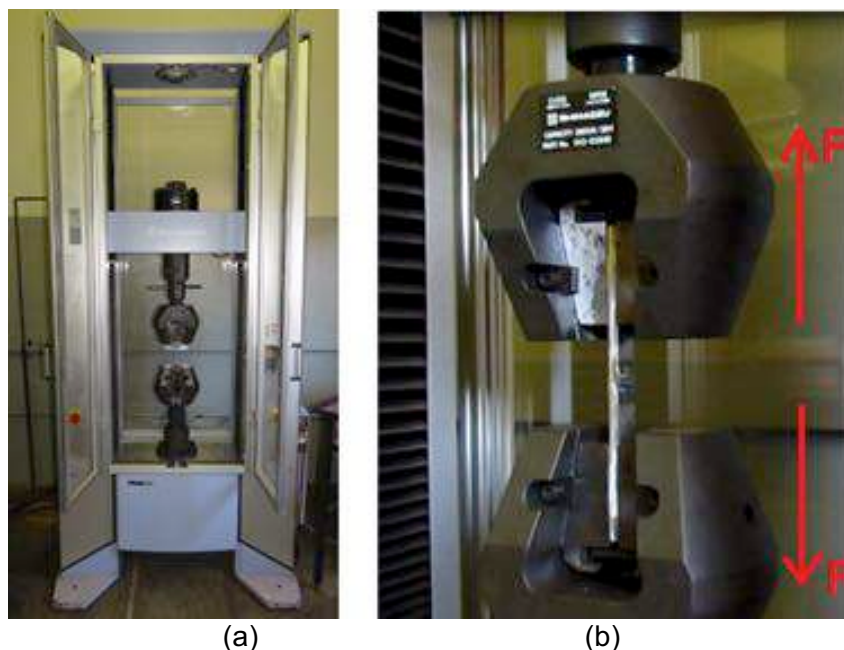


Figura 41. (a) Máquina universal de ensaios instrumentada da marca Shimadzu, modelo Autograph AG-X; (b) Detalhe do corpo de prova posicionado para o ensaio de tração

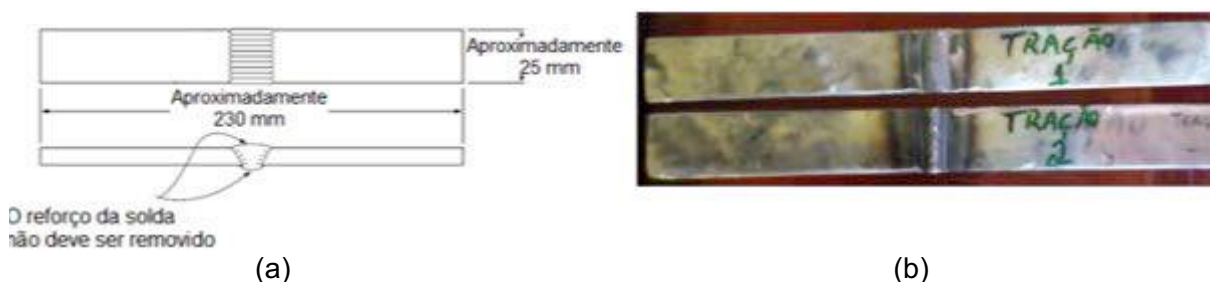


Figura 42. (a) Dimensões aproximadas dos corpos de prova para ensaio de tração (ADAPTADO DE API 1104, 2010); (b) Exemplo de corpo de prova fabricado

### 3.3.1.3 Ensaio de dobramento de face e raiz

O ensaio de dobramento consiste em submeter um corpo de prova a uma deformação plástica por flexão. O corpo de prova, assentado sobre dois apoios afastados a uma distância especificada, é dobrado por intermédio de um cutelo, que aplica um esforço de flexão no centro do corpo, até que seja atingido o ângulo de dobramento (INFOSOLDA, 2014), conforme visto na Figura 43a e b. O êmbolo deve ser forçado para dentro do intervalo até a curvatura da amostra tomar a forma aproximada de U (API 1104, 2010).

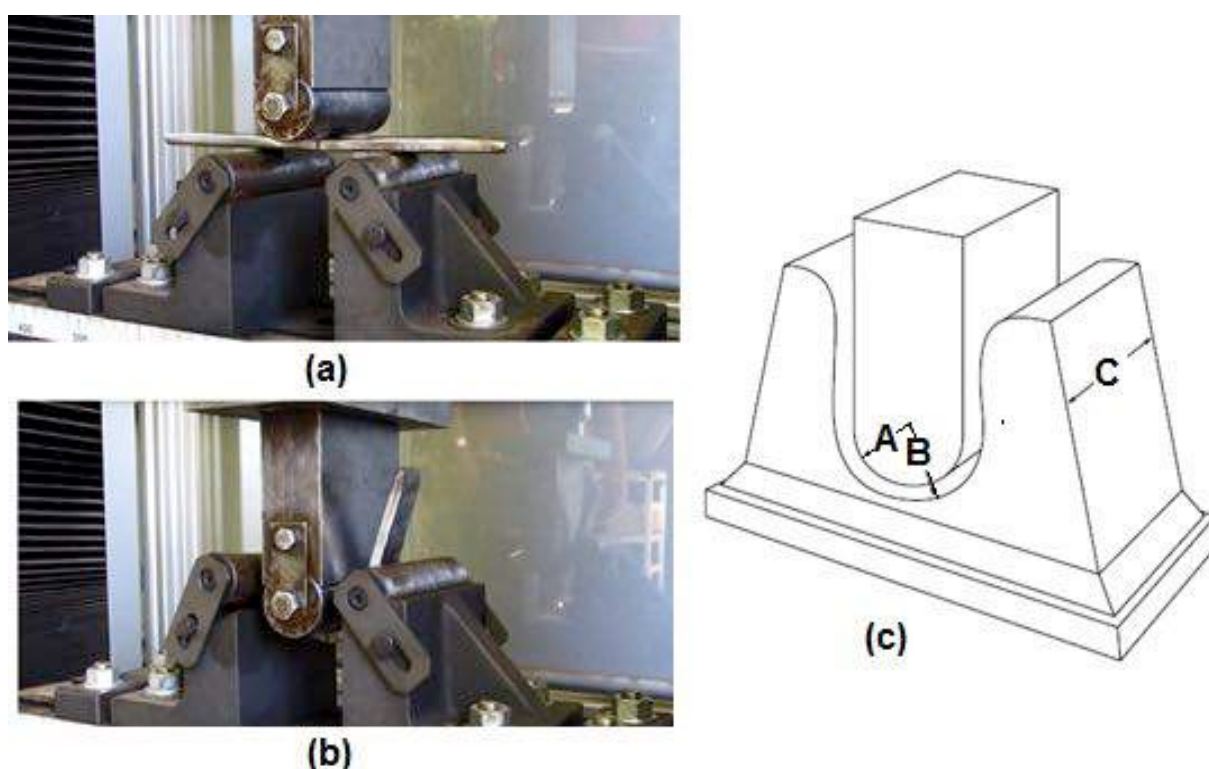


Figura 43. (a) Detalhe do corpo de prova posicionado inicialmente para o ensaio de dobramento; (b) Detalhe do corpo de prova submetido a forças do cutelo; (c) Indicações do raio do êmbolo (A), da matriz (B) e largura da fieira (C) (Adaptado de API 1104, 2010)

Embora forneça apenas resultados qualitativos, o ensaio de dobramento é um meio bastante simples e eficaz para detectar problemas metalúrgicos e de compacidade que podem afetar o comportamento dos materiais em serviço. O ensaio de dobramento é utilizado com o objetivo de verificar a capacidade de deformação dos materiais, na detecção de defeitos de compacidade e metalúrgicos e para obter valores comparativos de ductilidade dos materiais.

Para os ensaios de dobramento, utilizou-se máquina universal de ensaios instrumentada da marca Shimadzu, modelo Autograph AG-X (Figura 41a), com capacidade de 300 kN, controlada por meio de software Trapezium X, do mesmo fabricante.

O raio do êmbolo, da matriz e largura da fieira, segundo a norma API 1104 (2010) são de  $A = 45$  mm;  $B = 60$  mm e  $C = 50$  mm, respectivamente (Figura 43c). Destaca-se que API 1104 (2010) requer um cutelo de 45 mm de diâmetro, que não havia disponível. 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.

Conforme a API 1104 (2010), os corpos de prova submetidos ao ensaio de dobramento de face devem ser posicionados com a face da solda de enchimento virado para baixo. Já os corpos de prova submetidos ao ensaio de dobramento de raiz devem ser colocados com a face da solda de raiz virado para baixo.

A aplicação da força sobre o corpo de prova deve ser uniforme e contínuo. O ensaio foi executado com velocidade constante de 20 mm/min.

Os corpos de prova de face devem ter aproximadamente 9" (230 mm) de comprimento e cerca de 1" (25 mm) de largura (Figura 44a). O reforço de solda deve ser removido em ambas as faces (raiz e enchimento) nivelando-a com a superfície do metal de base. A amostra não deverá ser achatada antes do teste.

As amostras foram usinadas por fresamento para obter lados e superfícies lisas e todos os riscos existentes foram trabalhados para se manter transversal à solda.

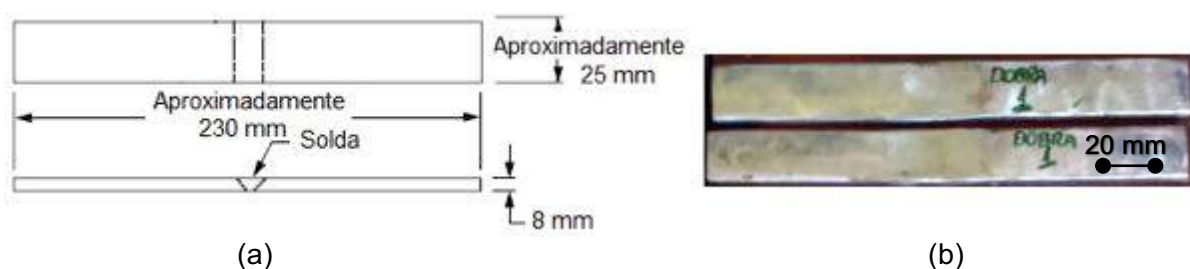


Figura 44. (a) Dimensões aproximadas dos corpos de prova para ensaio de dobramento (Adaptado de API 1104, 2010); (b) Exemplo de corpo de prova fabricado

#### 3.3.1.4 Ensaio nick-break

O ensaio de nick-break é útil para avaliar a qualidade interna do metal de solda. Este teste pode revelar vários defeitos internos (caso existentes), como inclusão de escória, porosidade, falta de fusão e oxidações.

O ensaio consiste em promover um esforço de flexão através de impacto, em um corpo de prova retirado de uma amostra de solda. Em um primeiro momento o corpo de prova é posicionado em um suporte de forma que uma das extremidades da amostra seja fixada. Logo em seguida é aplicado um impacto na outra extremidade (sobre a superfície do metal de base) com um martelo ou marreta.

O ensaio termina quando no local do entalhe o metal de solda se parte ao meio, caso, não aconteça essa abertura no metal de solda o ensaio deve ser repetido. A área de exposição da fratura deve ser de pelo menos  $\frac{3}{4}$ " (19 mm) de largura (API 1104, 2010).

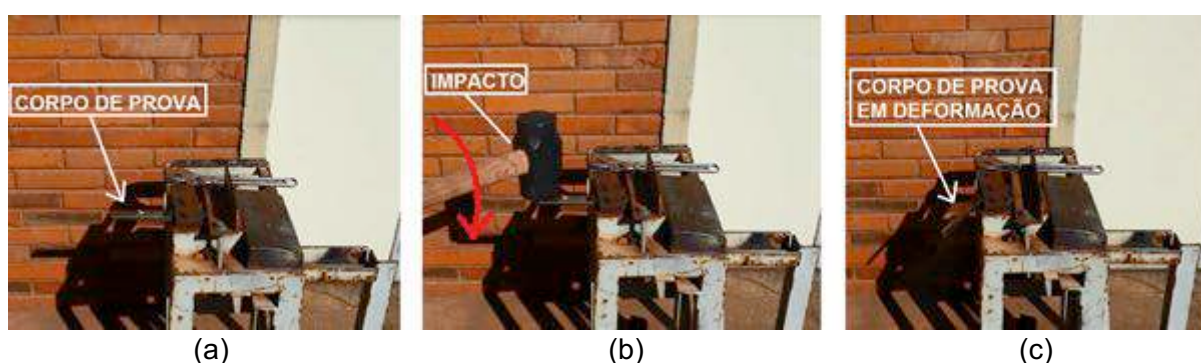


Figura 45. Etapas do Ensaio nick-break: (a) posicionamento do corpo de prova restringindo em um ponto; (b) impacto; (c) corpo de prova em deformação

De acordo com a API 1104 (2010), os corpos de prova para ensaio de nick-break devem ser de aproximadamente 9" (230 mm) de comprimento e cerca de 1" (25 mm) de largura. Os corpos de prova foram fabricados com 223 mm de comprimento devido ao tamanho do duto de teste. Os lados da amostra devem ser cortados ao longo da linha de fusão com uma serra, formando um entalhe de aproximadamente  $\frac{1}{8}$ " (3 mm) de profundidade.

A referida norma também cita que corpos de prova para ensaios nick-break preparados com entalhe lateral de 3 mm a partir de soldas feitas com certos processos mecanizados e semiautomático podem falhar em outros locais, em vez da solda. Quando a experiência de ensaios anteriores indica que falhas em outros locais pode ser esperado, o reforço externo pode ser entalhado com uma profundidade de não mais do que  $\frac{1}{16}$ " (1,6 mm), medida a partir da superfície da solda (Figura 46).

Tal observação foi justamente o fato ocorrido durante os ensaios, ou seja, durante a execução dos ensaios, a configuração utilizando-se 3 mm como entalhe lateral e de 1,6 mm no reforço, o centro do cordão de solda não se rompeu (Figura 47). Assim, decidiu-se por utilizar entalhe de 3 mm no reforço e de 1,6 mm na lateral, em que se obteve bons resultados.



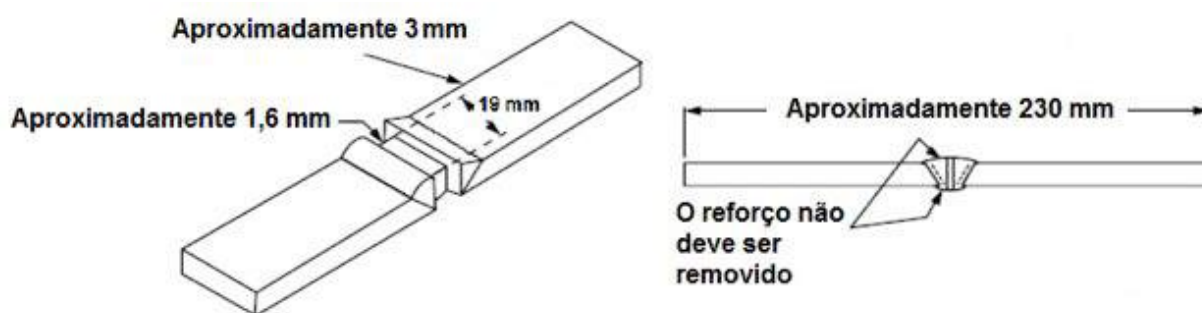


Figura 46. Dimensões dos corpos de prova para ensaio nick-break segundo API 1104 (2010)



Figura 47. Exemplo de corpo de prova que não se rompeu utilizando-se configuração de 3 mm como entalhe lateral e de 1,6 mm no reforço

As amostras finais devem ser trabalhadas para que as bordas fiquem paralelas, portanto, os corpos de prova foram usinados por fresamento. A solda de reforço não deve ser removida em ambos os lados da amostra. Exemplos de corpos de prova fabricados para o ensaio nick-break podem ser vistos na Figura 48.



Figura 48. Detalhe dos corpos de prova fabricados para ensaio de nick-break (espessura da chapa: 8,0 mm)

### 3.3.1.5 Ensaio de impacto charpy

Uma máquina de impacto charpy é aquela em que uma amostra com entalhe é quebrada por um único golpe de um pêndulo lançando livremente. O pêndulo é lançado de uma altura fixa. Como é conhecida a massa e a altura a que o pêndulo é levantado antes do seu movimento, a energia de impacto (por vezes também chamado de ductilidade) é determinada pelo equipamento. De acordo com o formato da “cabeça” do pêndulo é proporcionado um meio para indicar a energia absorvida na ruptura do corpo de prova por calibração.

Para o ensaio de charpy, utilizou-se equipamento Losenhauen com capacidade de 217 ft-lbf (295 J), sendo o entalhe feito no corpo de prova de tal forma que a propagação da trinca ocorra paralelamente ao eixo do cordão soldado. O corpo de prova foi posicionado conforme mostrado a Figura 49 durante o ensaio.

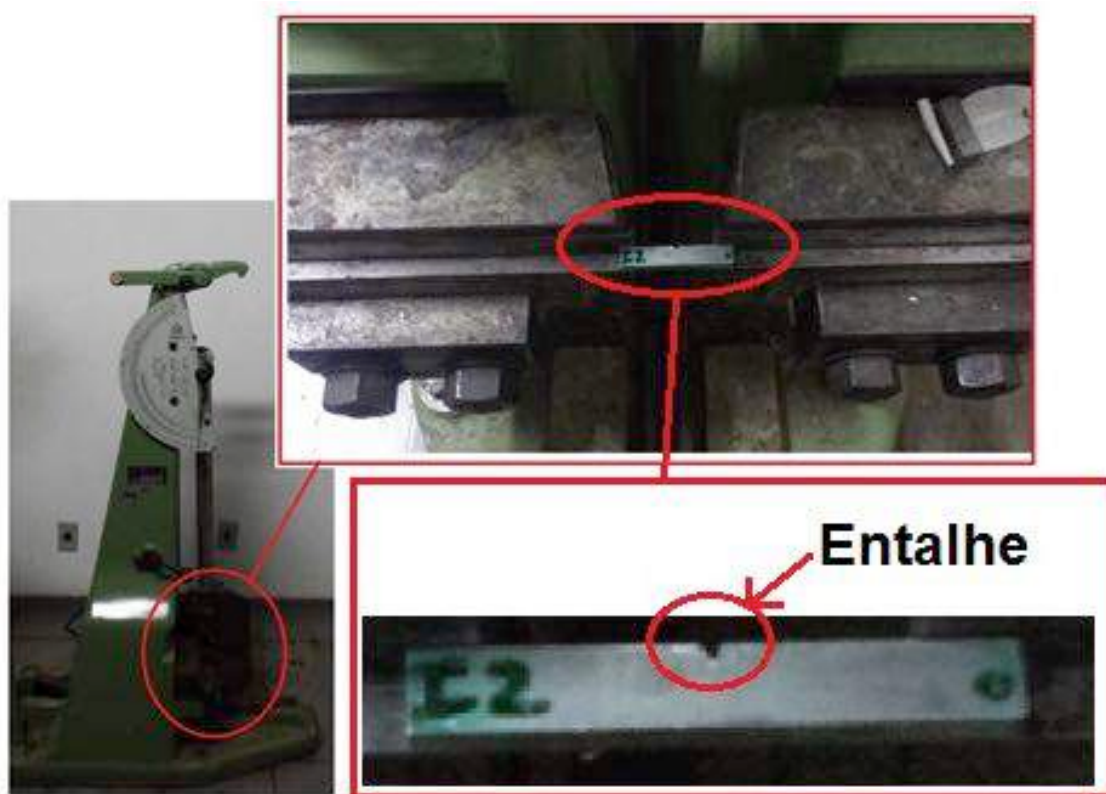


Figura 49. Máquina de impacto charpy Losenhauen e detalhes do posicionamento e entalhe da amostra

As dimensões dos corpos de prova (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 (CP full-size de dimensões iguais a 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 e a ASTM E23-12c, 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 (Figura 50).

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 (2010) (CP de 6,4 x 10 x 55 mm) quando possível.

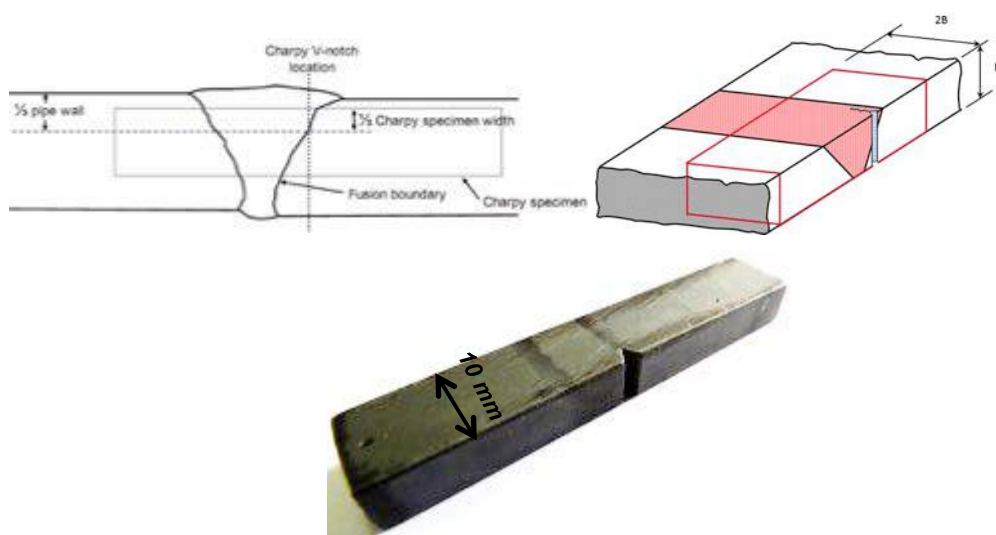


Figura 50. Detalhe dos corpos de prova para ensaio de impacto charpy com base nas normas API 1104:2010 (esquerda) e ISO 15653:2010 (direita), e exemplo CP fabricado (inferior) (SCOTTI ET AL, 2013)

Com base nessas dimensões, foi apresentado no Item 2.4.2.4, que para o corpo de prova *sub-size* de 6,4 mm, o requerimento do ensaio charpy no presente trabalho é de 25,6 J @ -12,2 °C, o que equivale a 40 J @ 0 °C. Assim, para se atingir a esta temperatura final de -12,2 °C na amostra, utilizou-se uma mistura de monoetilenoglicol, álcool etílico e água na proporção calculada em função de seus pontos de fusão (Eqs. 11 a 13). A seleção dos três componentes baseou-se na faixa de abrangência entre os pontos de fusão dos mesmos (0°C a -89°C) para proporcionar a temperatura desejada (-12,2°C) quando misturados.

Apesar da temperatura final ser de -12,2°C, a temperatura calculada foi de -14,2°C para manter uma certa folga e garantir que durante o ensaio a temperatura não ultrapasse

de -12,2°C. A temperatura final foi medida com termômetro de contato Extech HD200, oscilando em  $\pm 1,0$  °C. Assim, quando a temperatura mensurada aproxima-se de -12,2 °C o pendulo é liberado para o impacto.

O monoetilenoglicol que possui ponto de fusão -13,0 °C, pouco influi na média final da temperatura por ter um valor intermediário, mas sua presença é importante pois é um anticongelante.

A Tabela 12 foi criada para facilitar a determinação da temperatura final TF [°C] para cada proporção utilizada. Nesta tabela, os valores de são calculados com base nas Eqs. 11, 12 e 13, onde m é a massa total em gramas do componente, TC são os valores de temperatura dos componentes da mistura e TCmed é a temperatura média final.

$$m [g] = \text{Densidade [g/cm}^3] \times \text{Volume [cm}^3] \quad (11)$$

$$\text{Proporção (\%)} = \frac{\text{Volume solução desejada [cm}^3]}{\text{Volume água [cm}^3] + \text{Volume álcool [cm}^3] + \text{Volume monoet [cm}^3]} \times 100 \quad (12)$$

$$TC [^{\circ}C]_{\text{méd}} = \frac{TC [^{\circ}C]_{\text{água}} \times m [g]_{\text{água}} + TC [^{\circ}C]_{\text{álcool}} \times m [g]_{\text{álcool}} + TC [^{\circ}C]_{\text{monoet}} \times m [g]_{\text{monoet}}}{m [g]_{\text{água}} + m [g]_{\text{álcool}} + m [g]_{\text{monoet}}} \quad (13)$$

Tabela 12. Valores finais para determinação da temperatura final da solução

Componentes	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	Volume [cm <sup>3</sup> ]	Proporção (%)	TC [°C]	m [g]	TCmed [°C]
Água	1,000	600	63,16	0	600	-14,2
Álcool isopropílico	0,786	150	15,79	-89	117,9	
Monoetilenoglicol	1,110	200	21,05	-13	222	

Assim, o volume de água, álcool isopropílico e monoetilenoglicol utilizados para atingir -14,2°C foram respectivamente de 600 cm<sup>3</sup>, 150 cm<sup>3</sup> e 200 cm<sup>3</sup>. A solução é mergulhada em nitrogênio líquido por aproximadamente 6 minutos para atingir a temperatura desejada. Logo depois as amostras são mergulhadas na solução à -14,2°C e conservadas em uma caixa de isopor até entrarem em equilíbrio térmico.

O entalhe com 0,025 mm de profundidade e ângulo de 90° em V (ASTM 370, 2012) é colocado na zona afetada pelo calor (ZAC) de tal modo que o entalhe em V intersecta o limite da zona fundida no local da parede do tubo de 1/3 diâmetro externo do tubo. Para localizar o limite da zona fundida é necessário atacar a amostra com Nital 2% durante 40 segundos (Figura 51c).

Para fabricação do entalhe desenvolveu-se nesta pesquisa uma ferramenta de aço rápido para auxiliar na execução do entalhe. O posicionamento da amostra durante a fabricação do entalhe na fresadora e da ferramenta desenvolvida são mostrados na Figura 51.

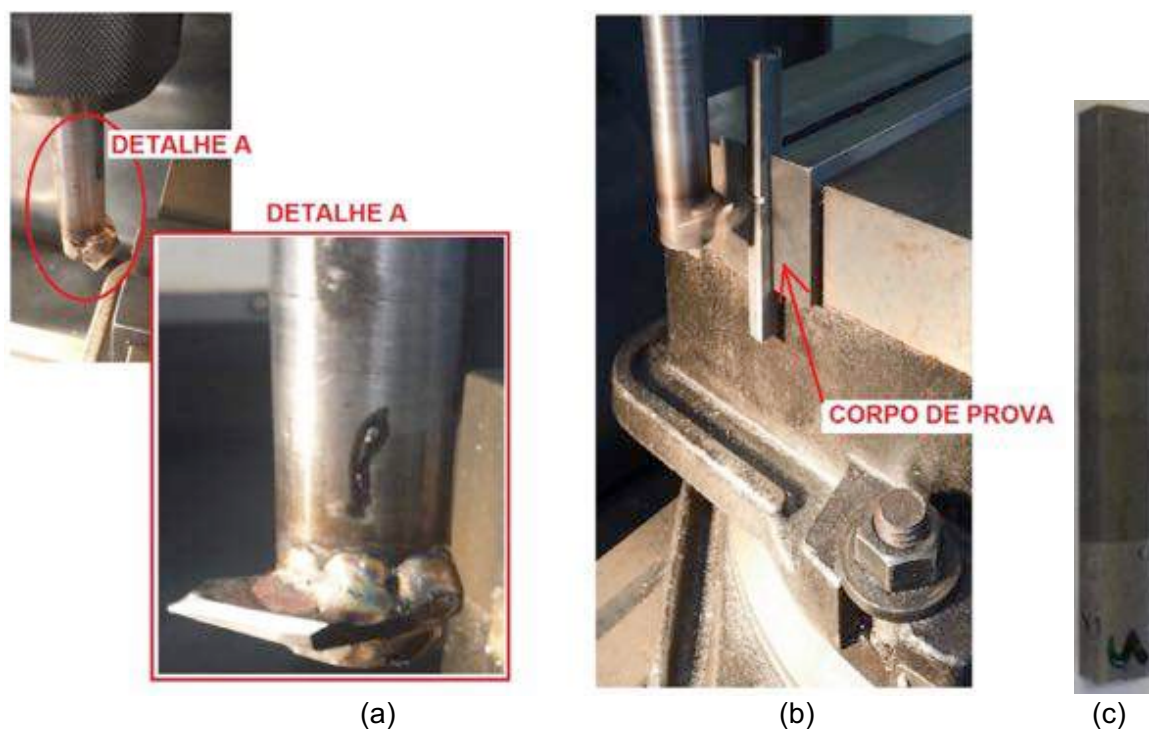
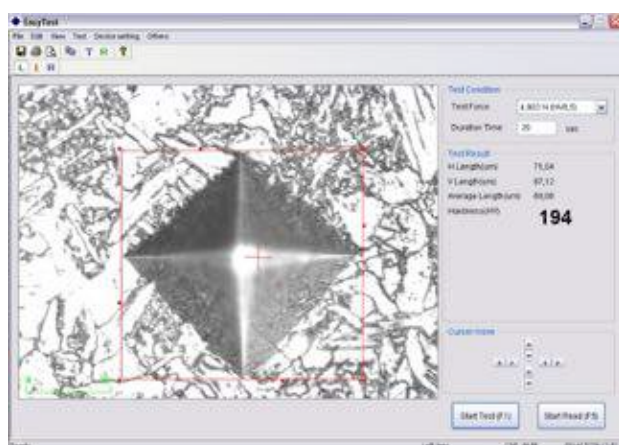


Figura 51. (a) Detalhe da ferramenta em aço rápido desenvolvida em laboratório para auxiliar na fabricação do entalhe no corpo de prova de charpy; (b) Detalhes do posicionamento da amostra e da ferramenta durante a fabricação do entalhe; (c) Amostra atacada com Nital 2% para identificação do limite da zona fundida

### 3.3.1.6 Ensaio de dureza vickers

Neste ensaio, um pequeno indentador de diamante tendo geometria piramidal é forçado com carga constante para dentro da superfície da amostra. A resultante da impressão após a remoção da carga é observada sob um microscópio (Figura 52a) e medida; esta medição é então convertida a um número de dureza (Equação 14), conforme norma ISO 6507 (2005). A representação dos parâmetros de impressão pode ser observada na Figura 52b.



(a)



(b)

Figura 52. (a) Exemplo de impressão realizada em corpo de prova fabricado nesta pesquisa durante ensaio de dureza; (b) Representação dos parâmetros de impressão (ADAPTADO DE CALLISTER, 2008)

As amostras foram cuidadosamente preparadas superficialmente (lixamento até 1200 e polimento com alumina) para assegurar uma indentação bem definida e também de facilitar a identificação das regiões impostas pela Figura 3 da norma ISO 9515 (2001), por meio do microscópico, com o objetivo de realizar medidas precisas.

$$\text{Dureza Vickers (H)} = 0,1891 \frac{F}{S} \quad (14)$$

Onde, A dureza Vickers “H” exprime-se pelo quociente entre a carga “F”, em Newton, e a superfície de impressão “S” em mm<sup>2</sup> representado aqui por uma das dimensões da impressão “d1” elevada ao quadrado.

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 para localizar as regiões.

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 a 2 mm do limite da face e onze medidas na face inferior a 2 mm do limite da raiz, em conformidade com as normas ISO 9015-2 (2003) e ISO 6507-1 (2005). De acordo com a Tabela 2 desta norma foi respeitada a distância entre indentações de 0,7 mm para ensaios com HV 5.



## **CAPÍTULO IV**

### **DESENVOLVIMENTO E TESTES PRELIMINARES**

Neste capítulo são apresentados os desenvolvimentos e testes preliminares para garantir o correto funcionamento da bancada experimental e estabelecer os parâmetros iniciais de soldagem para o chanfro proposto com base em trabalhos anteriores do Grupo Laprosolda (em específico para o passe de raiz) e que foram executados pelos processos de soldagem GMAW curto-circuito convencional e derivativo (STT). Além disso, são apresentados ensaios termográficos para avaliar qualitativamente o decaimento de temperatura em ambos os lados das juntas soldadas, motivados pela elevada frequência da falta de fusão lateral em cordões de soldas presentes em resultados anteriormente investigados por Scotti et al. (2013).

#### **4.1 Desenvolvimento preliminares**

##### **4.1.1 Sistema eletrônico de acionamento sincronizado**

De maneira a facilitar a realização dos testes ao iniciar a soldagem é necessário acionar simultaneamente a fonte de soldagem, o sistema de aquisição de sinais e a movimentação do carrinho que sustenta a tocha.

O Tartílope V4 (dispositivo de movimentação orbital da tocha utilizado) permite acionar a fonte de soldagem e o carrinho em um mesmo instante ao pressionar o botão “Dispara Fonte” e em seguida o botão “Dispara Tartílope” (Figura 30), mas não dispara o sistema de aquisição de sinais (Figura 27) por serem sistemas independentes.

Assim, o operador precisa iniciar a aquisição de sinais por meio do software LabView®, posicionar-se à frente do tubo, fechar a máscara de soldagem e iniciar a processo de soldagem pressionando o botão “Dispara fonte” no controle manual.

Este procedimento gera atraso entre o início da soldagem e a aquisição de sinais. Desse modo, a Equação 10, que calcula o tempo de aquisição de sinais, passa a não ter a precisão necessária. Se o atraso entre iniciar a soldagem e o acionamento da aquisição não for o previsto, acrescidos de um fator de atraso, o operador deverá abortar a preparação de

inicialização da soldagem e ajustar a aquisição novamente. Tal fato, ao se tornar repetitivo, aumenta o tempo de produção e consequentemente os custos da pesquisa.

Magalhães (2012) desenvolveu um circuito com três relés em série que, ao ser acionado, dispara simultaneamente a fonte de soldagem, o Tartílope V4 e um equipamento simulador de soldagem por retificação, mas não dispara o sistema de aquisição.

Assim, foram desenvolvidos hardware e software em Linguagem LabView®, este último mostrado no Apêndice III, que detecta o início da soldagem, dispara a fonte de soldagem, o Tartílope V4 e o sistema de aquisição de sinais em um mesmo instante.

O sincronismo de disparo dos equipamentos envolvidos acontece quando o operador já posicionado à frente do tubo aciona o botão “Dispara Tartílope”, após pressionar o botão “Dispara Fonte” ambos no controle manual do Tartílope V4.

Conforme visto na Figura 54, para iniciar a aquisição de sinais automaticamente o programa desenvolvido em LabView® deve estar em *loop* (botão “*play*” do software ambiente acionado) aguardando que o nível “zero” enviado pela porta 32 (terra) do módulo NI-6009 seja detectada pela porta de entrada digital 24 “P0.7”. Esta técnica substitui um tipo de *Trigger* externo que não é disponibilizado pelo módulo NI-6009. A Figura 53 mostra os terminais 24 (entrada digital) e 32 (terra) da placa de aquisição utilizados na implementação do sistema eletrônico de sincronismo.

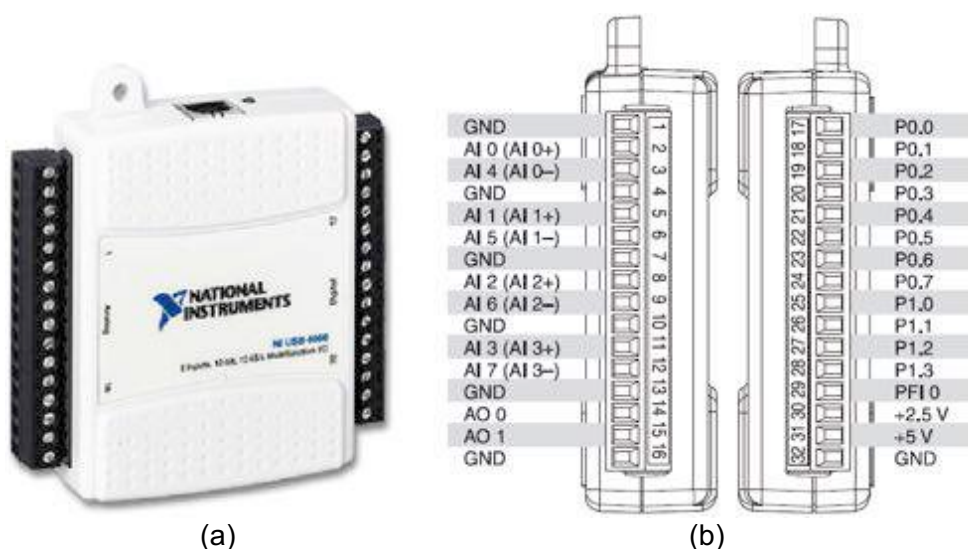


Figura 53. (a) Placa de aquisição modelo NI USB-6009; (b) Detalhamento dos terminais de entrada e saída do módulo (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014)

Os comandos “Dispara Tartílope” e “Dispara Fonte” são intertravados internamente pelo sistema eletrônico do Tartílope V4, ou seja, a fonte de soldagem dispara apenas se o



carrinho do Tartílope V4 movimentar. Para disparar a fonte antes de iniciar o movimento, deve ser programado o tempo de disparo na interface do programa Tartílope V4.

A CPU responsável pelo acionamento do carrinho do Tartílope disponibiliza uma saída auxiliar na parte traseira, denominada de “Fonte”, para o acionamento sincronizado com a fonte de soldagem. O acionamento remoto das fontes de soldagem das fabricantes Lincoln e Miller acontece quando dois terminais específicos e localizados na própria fonte estão em curto-circuito. Portanto, é necessário interligar esses terminais específicos na saída da CPU.

O intertravamento mostrado na Figura 54 se mostrou eficiente na realização dos testes, resultando em economia de tempo na execução das soldas.

Por fim, eliminou-se a necessidade de um ajudante e aumentou a concentração do pesquisador (“soldador”) antes do disparo do sistema orbital.



Figura 54. Diagrama de interligação do circuito eletrônico de sincronismo

#### 4.1.2 Sistema eletrônico de controle da DBCP

Segundo UFSC (2010), o manipulador acompanha o formato cilíndrico do tubo para manter uma DBCP constante. Mas conforme dito no Item 3.2.7, existe um desvio de circularidade nos tubos testes, tornando inconstante a DBCP ao longo da meia cana. É notado também um desvio de circularidade na cinta que suporta o carrinho do Tartílope V4 e que contribui diretamente na amplificação das variações da DBCP.

Magalhães (2012) iniciou o desenvolvimento de um controle, denominado pelo autor de “On/Off”, ao perceber que a DBCP não se mantinha constante durante a utilização do mesmo equipamento (Tartilope V4), mas não chegou a ser levada adiante, pois, optou por soluções mecânicas.

Neste trabalho aplicou-se a solução eletrônica idealizada, mas não implementada no trabalho de Magalhães (2012). A vantagem desse sistema consiste no fato que mesmo existindo desvios de circularidade tanto na cinta quanto nos tubos testes, este último não mensurável devido a possibilidade de desvios nas dimensões definidas por normas e a variação no acabamento superficial inconstante, o controle eletrônico sempre manterá a DBCP constante.

O controle da DBCP é efetuado, ajustando a altura da tocha à peça, interferindo diretamente no funcionamento do motor que controla o eixo “Z”. A partir da leitura do sensor *laser* da marca Leuze Electronics que correlaciona distância e tensão é possível obter o *feedback* da posição da tocha em relação ao tubo teste (DBCP), em tempo real. Os dados do sensor *laser* são discriminados na Tabela 13. O sensor foi posicionado no suporte do Tartilope V4 que sustenta a tocha de soldagem (Figura 55).

Tabela 13. Dados de manual do sensor *laser*

Modelo	Classe	Potência de saída	Duração dos pulsos	Comprimento de onda
ODSL 8	2	1,2 mW	4 ms	650 nm

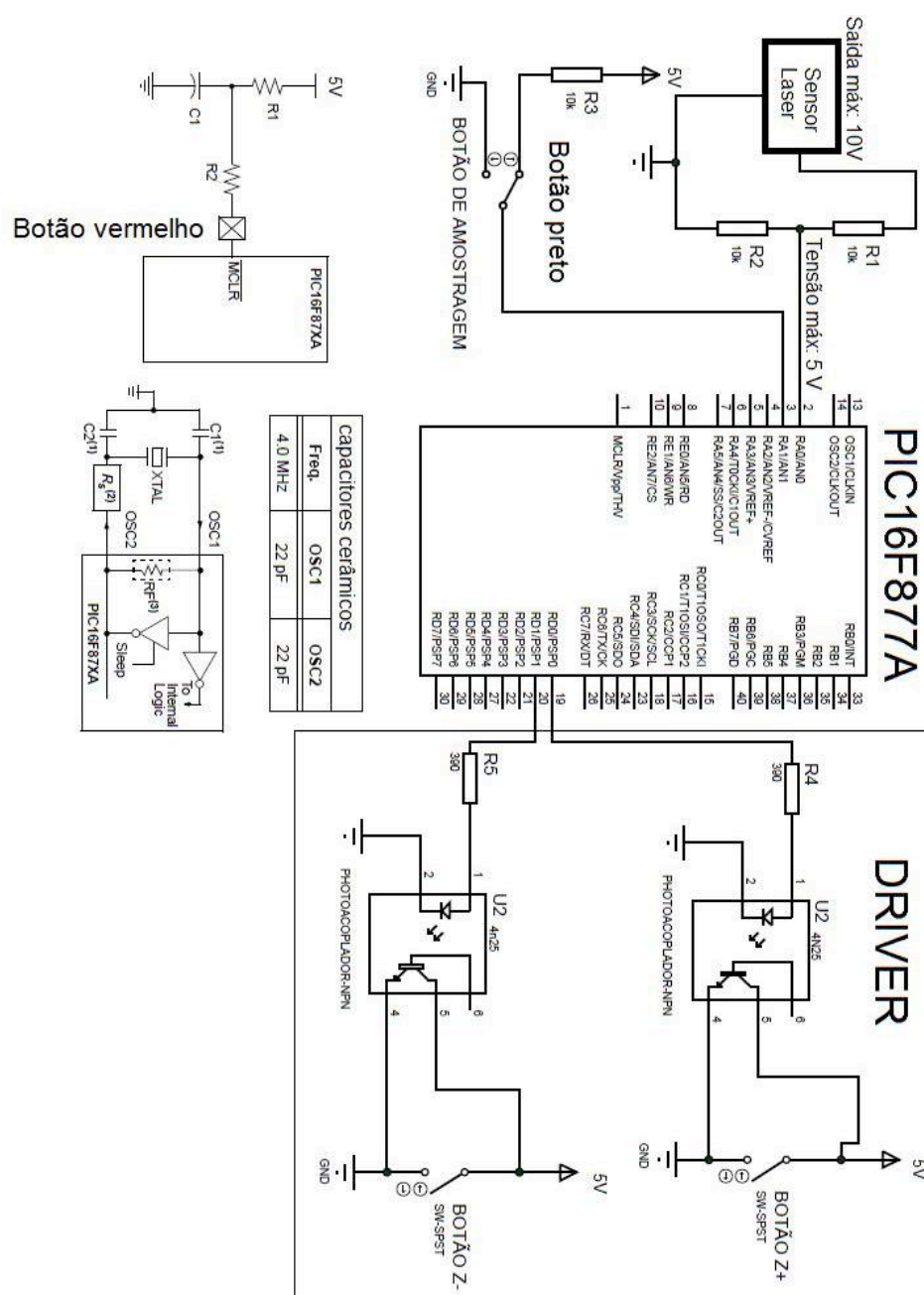
Conforme pode ser observado na Figura 55, devido ao acabamento superficial e a dispersão feixe de *laser* sobre o tubo é preciso utilizar uma fita fixada à superfície do duto teste, de forma a evitar perdas de sinal e consequentemente garantir a correta leitura do feixe refletido.



Figura 55. Posicionamento do sensor *laser* para monitorar a DBCP (comprimento do duto: 223 mm)

#### 4.1.2.1 Projeto do circuito de controle

Para controlar a DBCP foi projetado um circuito de controle (Figura 56) composto por um PIC 16F877A, fontes de alimentação, drivers de acionamento e botões auxiliares (Figura 57). Para adquirir o sinal do sensor *laser* foi montado um divisor de tensão composto por resistores, dado que a entrada analógica do PIC suporta somente até 5 Vcc. A saída do divisor de tensão foi interligada na porta de entrada analógica “AN0” do PIC16F877A.



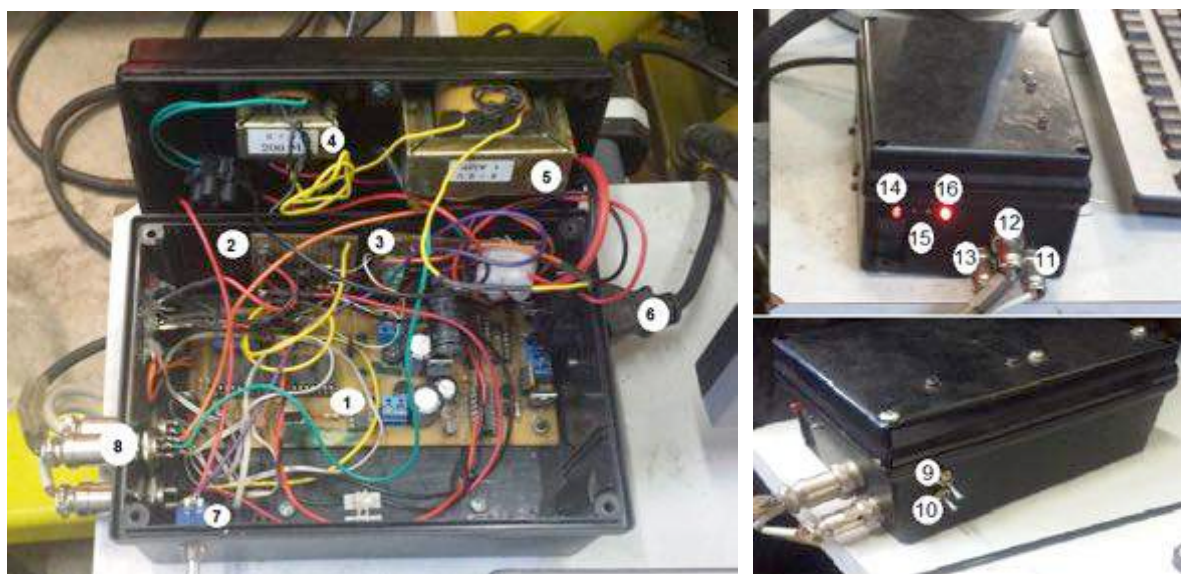


Figura 57. Equipamento de controle da DBCP sendo: 1. Circuito de controle PIC16F877A; 2. Driver de acionamento; 3. Fonte de tensão 18V; 4. Transformador 6 + 6 V; 5. Transformador 9 + 9 V; 6. Cabo de alimentação 220 Vca; 7. Chave liga/desliga de 250V/2A; 8. Cabos de interligação entre sensor led, CPU e botões de set e reset do controle manual; 9. Chave liga/desliga sensor led; 10. Chave liga/desliga PIC16F877A; 11. Cabo de interligação entre driver e CPU; 12. Cabo de alimentação do sensor *laser*; 13. Cabo de interligação entre botões auxiliares e PIC16F877A; 14. Led indicador de alimentação do PIC16F877A; 15. Led indicador de acionamento de Z+ ou Z-; 16. Led indicador de controle da DBCP acionado

O controle manual foi adaptado, na parte traseira, para receber dois novos botões auxiliares do controle da DBCP (Distância Bico Contato Peça). O botão de cor vermelha tem a função de ligar e desligar o controle automático e o botão de cor preta a função de ajustar o valor referência (Figura 58).

Ao acionar o botão “vermelho”, mantendo-o em nível “0”, o programa de ajuste da DBCP é iniciado. Para desabilitar o controle da DBCP, basta pressionar o botão vermelho, movendo para a posição “1”.

O valor de referência (set point) é ajustado elevando o botão de cor “preta” para nível “1” e em seguida para nível “0”. O microcontrolador PIC16F877A ao interpretar a borda de descida na porta AN1, registrará o valor da tensão referência, provindo do sensor *laser*, lido na porta AN0. O valor de tensão ajustado refere-se ao valor da DBCP em “mm” que se manterá constante durante toda a trajetória da tocha. Para ajustar um valor de DBCP superior ao posicionado é necessário “resetar” o PIC utilizando o botão “vermelho”.



Embora não estejam representados na Figura 56, dois capacitores cerâmicos de 100nF são colocados em paralelo na alimentação do microcontrolador. Essa boa prática auxilia filtrar ruídos de alta frequência provenientes da rede elétrica e que possivelmente poderão afetar o funcionamento do PIC16F877A.

E por fim, é implementado um driver que recebe os sinais digitais das saídas do microcontrolador e aciona o circuito que controla o motor do eixo Z no Tartilope V4. Este driver é composto apenas de resistores e do fotoacopladores (4N25).

O fotoacoplador de modelo 4N25 é responsável pelo isolamento elétrico entre a saída do PIC e os circuitos de entrada do sistema de controle do Tartilope. Neste caso não há relação entre os “terras” de controle e de potência de ambos. Logo, o sinal de saída do PIC é repassado ao circuito de controle do Tartilope V4 sem contato elétrico, evitando assim o transito de ruídos indesejados.

Por fim, a Figura 58 mostra o detalhe do cabo que interliga em série os botões “DISPARO TARTÍLOPE” E “DISPARO FONTE” ao módulo de aquisição NI-6009, descritos anteriormente na Figura 54.



Figura 58. Detalhe de adaptação do controle manual

Com o objetivo de interligar os fotoacopladores 4N25 ao circuito de acionamento dos motores do eixo Z, foi realizada a ligação em paralelo entre a saída dos drivers do controlador desenvolvido e os botões Z+ e Z-. Esta interligação foi feita diretamente nos terminais localizados na CPU, ou seja, é interligado um cabo entre o equipamento de controle da DBCP e terminais da CPU que recebem comandos do controle manual. Para

tanto, foi levantado em campo estes terminais, uma vez que, não são disponibilizados em manual. Os terminais de interesse na CPU são apresentados na Figura 59.

Durante o desenvolvimento do sistema notou-se ruídos e uma amplitude de amortecimento grande e impraticável para o processo de soldagem, ou seja, o controle automático corrigia a DBCP após uma variação de aproximadamente 2,0 mm em relação a DBCP desejada. Assim, foi desenvolvido e implementado um filtro digital (Item 4.1.2.4), com o intuito de eliminar ruídos e consequentemente analisar o impacto na variação na amplitude do amortecimento.



Figura 59. Interligação entre o driver do controle automático da DBCP e o controle manual (acionamento do motor Z+ e Z-)

#### 4.1.2.2 Projeto da fonte de tensão para alimentação do sensor *laser*

A tensão nominal de alimentação do sensor varia entre 18 Vcc e 30 Vcc e entrega uma tensão proporcional à distância medida de 0 a 10 Vcc (Leuze Eletronics,2011). Portanto, desenvolveu-se uma fonte de alimentação retificadora CA/CC para alimentar o sensor com 18 Vcc.

Nesta fonte, a tensão elétrica da rede é conectada ao transformador através de uma chave (250 Vca e 2 A) com função liga/desliga. O transformador utilizado para a implementação da fonte foi o abaixador de tensão (220 Vca/9 + 9 Vca) de corrente nominal igual a 1 A. A tensão de saída no transformador é retificada por uma ponte completa de

diodos (IN4007) e por intermédio de capacitores a tensão média é aumentada e a tensão de “ripple” é minimizada.

Os capacitores eletrolíticos são calculados recorrendo a Equação 15 (MALVINO, 1997). A corrente máxima de consumo do sensor *laser* é de 70 uA. Adotou-se o componente comercial disponível com valor acima do calculado.

$$C = \frac{Imáx}{2 \times fr \times \Delta V_{ripple}} \quad (15)$$

Onde, “fr” é a frequência da rede;  $\Delta V$  a tensão de *ripple* e  $Imáx$  a corrente máxima de projeto.

Após a tensão ser tratada pelos capacitores, o regulador de tensão LM 7818 mantém a tensão em +18Vcc na saída (ALLDATASHEET, 1999). Foi utilizado também um capacitor de 180nF de poliéster após o regulador de tensão para eliminar ruídos. Experimentalmente a fonte entregou em sua saída 17,98 Vcc. A mensuração da tensão de saída foi realizada com multímetro da fabricante Fluke, de modelo 17B+, resolução de 0,01 e precisão de 0,5% (Fluke, 2014). O diagrama esquemático da fonte montada é mostrado na Figura 60.

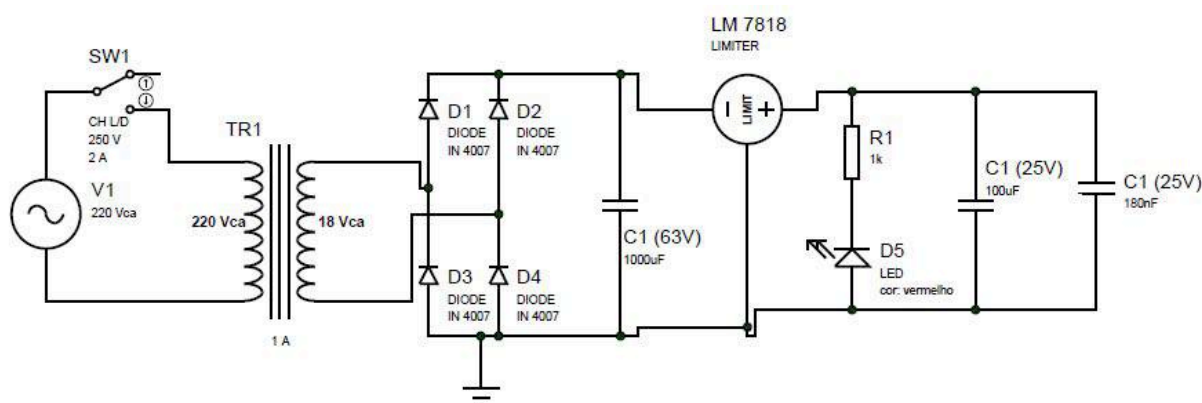


Figura 60. Esquema elétrico da fonte de alimentação 18Vcc

#### 4.1.2.3 Projeto da fonte de tensão do PIC16F877A

A tensão nominal de alimentação do PIC16F877 varia entre 2,0 Vcc 5,5 Vcc (ALLDATASHEET, 203). Portanto, o sensor é alimentado com 5 Vcc por meio de uma fonte de tensão retificadora CA/CC montada em laboratório.

Nesta fonte, a tensão elétrica da rede é conectada ao transformador através de uma chave (250 Vca e 2 A) com função liga/desliga. O transformador utilizado para a implementação da fonte foi o abaixador de tensão (220 Vca/6 + 6 Vca) de corrente nominal igual de 0,2 A. A tensão de saída no transformador é retificada por uma ponte completa de diodos (IN4007) e por intermédio de capacitores a tensão média é aumentada e a tensão de “ripple” é minimizada.

Após a tensão ser tratada pelos capacitores, o regulador de tensão LM 7805 mantém a tensão em +5Vcc na saída (ALLDATASHEET, 2001). Os capacitores eletrolíticos são calculados recorrendo a Equação 15 (MALVINO, 1997). A corrente máxima de consumo do PIC16F877 é da ordem de 400  $\mu$ A. Adotou-se o componente comercial disponível com valor acima do calculado.

Experimentalmente a fonte entregou em sua saída 4,99 Vcc. A mensuração da tensão de saída foi realizada com multímetro da fabricante Fluke, de modelo 17B+, resolução de 0,01 e precisão de 0,5% (Fluke, 2014).

Um led de cor vermelha, localizado na parte frontal do equipamento, sinaliza ao operador que o PIC está energizado (Figura 57). O diagrama esquemático da fonte construída é pode ser vista na Figura 61.

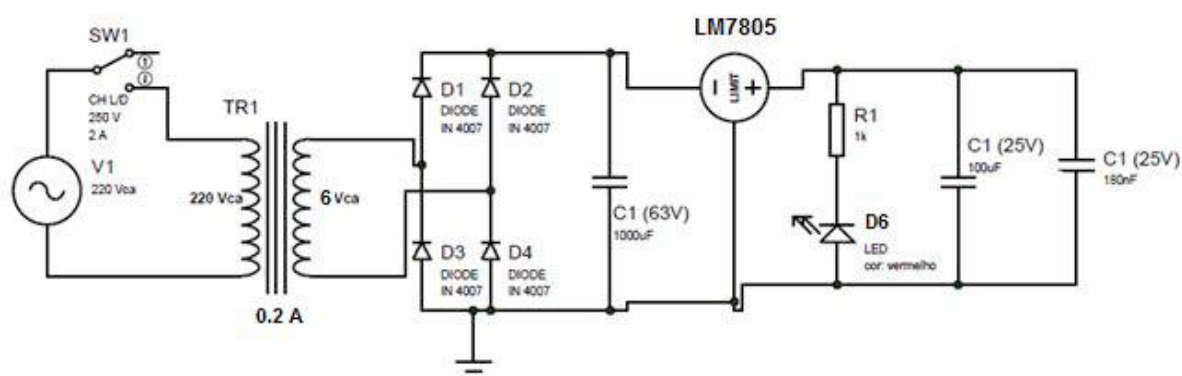


Figura 61. Esquema elétrico da fonte de alimentação 5 Vcc

#### 4.1.2.4 Filtro digital

Segundo Magalhães (2012), a oscilação da saída em torno do “set point” ou tensão referência do controlador, a chamada histerese, não garante precisão, o que pode causar desgaste do atuador, devido a acionamentos frequentes. Os acionamentos frequentes podem ser agravados por inserção de ruídos no circuito, assim como uma variação em amplitude muito grande durante o amortecimento, como por exemplo 2,0 mm entorno da



DBCP referência, e o tempo de resposta muito baixo descartam a utilização do sistema eletrônico de ajuste automático.

Segundo Mpmendes (2009), no processamento de sinal, a função de um filtro é remover partes indesejadas do sinal, tais como ruídos aleatórios. Um filtro digital usa um processador digital para fazer cálculos numéricos sobre os valores de amostragem do sinal.

O sinal analógico, neste caso provindo do sensor *laser*, é amostrado e digitalizado usando um AD (conversor analógico digital) interno ao microcontrolador PIC. Os números binários resultantes, que representam as amostragens sucessivas do sinal de entrada, são transferidos para a execução de cálculos numéricos sobre eles. Estes cálculos envolvem tipicamente a multiplicação dos valores de entrada por constantes e adição dos produtos.

O resultado destes cálculos, que representam agora os valores amostrados do sinal filtrado, poderão ser enviados para um DA (conversor digital analógico) para converter novamente o sinal para a forma analógica (Figura 62).

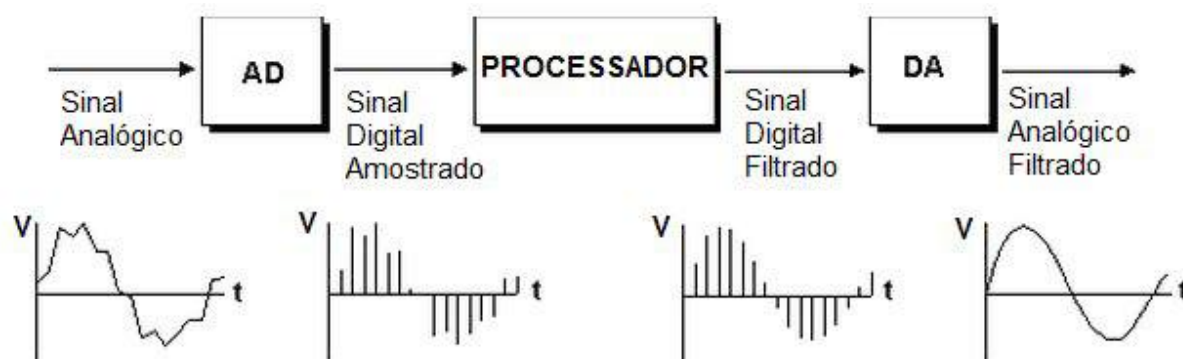


Figura 62. Princípio de funcionamento de um filtro digital (ADAPTADO DE MPMENDES, 2009)

O sinal de saída do sensor *laser* da Lauze foi conectado a um osciloscópio digital com a finalidade de determinar a frequência de oscilação (ruído) em torno da tensão disponibilizada pelo mesmo, sendo identificados ruídos da ordem de 20 kHz. Assim, este sinal foi filtrado digitalmente, por intermédio de um filtro digital “*butterworth*” de segunda ordem.

A ordem de um filtro digital pode ser definida como o número das entradas anteriores (armazenadas na memória do processador) usadas para calcular a saída. Um filtro recursivo é um que além dos valores de entrada anteriores usa também valores das saídas anteriores. A expressão para um filtro recursivo contém não só os termos envolvendo os valores de entrada ( $x_n, x_{n-1}, x_{n-2}, \dots$ ) mas também os termos  $y_{n-1}, y_{n-2}$ , de saída. A equação do filtro recursivo em questão pode ser escrita na forma da Eq. 16.

$$a_0y_n = b_0x_n + b_1x_{n-1} + b_2x_{n-2} - a_1y_{n-1} - a_2y_{n-2} \quad (16)$$

Onde, as constantes  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , que aparecem nas expressões são chamadas de coeficientes do filtro e  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  de termo recursivo. Os valores destes coeficientes determinam as características de um filtro particular.

Os coeficientes da Eq. 16 foram calculados com o auxílio do software Matlab®. A função adotada é mostrada na Eq. 17 e se refere ao filtro “*Butterworth filter design*” para “*IIR Digital Filters Design*” (recursivo), onde “ $n$ ” é a ordem do filtro e “ $wn$ ” a frequência de corte “*cutoff frequency*” (variando de 0 a 1).

$$[b,a] = \text{butter}(n,wn,'ftype') \quad (17)$$

Para o cálculo dos coeficientes adotou-se “ $n$ ” igual a 2 (segunda ordem), “ $wn$ ” aproximadamente 400Hz (normalizado entre 0 e 1) e  $ftype$  igual a ‘low’ para filtro passa baixa. Os valores retornados pelo Matlab® são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14. Valores retornados pelo Software Matlab® para a função da Eq. 3

n	0	1	2
Bn	0,0201	0,0492	0,0201
an	1	1,5610	0,6414

Substituindo-se os valores da Tabela 14 na Eq. 16, tem-se a Eq. 18 utilizada na programação apresentada no Apêndice I.

$$y_n = 0,0201x_n + 0,0492(x_{n-1}) + 0,0201(x_{n-2}) + 1,5610(y_{n-1}) - 0,6414(y_{n-2}) \quad (18)$$

Posteriormente a aplicação do filtro digital notou-se que a DBCP passou a corrigir com aproximadamente 1,0 mm de variação em torno da DBCP desejada. Embora seja muito para a soldagem a variação de 1,0 mm, a correção é realizada com amortecimento suave e apresentou bons resultados durante a execução dos cordões. Destaca-se que o sensor *laser* foi fixado com parafusos para eliminar possíveis vibrações provocadas pelo tecimento do Tartilope.

Por fim, foi realizado o reposicionamento da cinta que sustenta o carrinho, devido ao seu desvio de circularidade, para minimizar a atuação da correção do eixo Z.

#### 4.1.2.5 Algoritmo de funcionamento

Baseando-se no algoritmo de funcionamento de Magalhães (2012), neste item será informado a lógica de funcionamento englobando as modificações.

O sinal de tensão provindo do sensor *laser* (DBCP) é amostrado na porta AN0 e processado pelo microcontrolador PIC16F877A, que por sua vez, envia sinais de comando para o motor que controla o eixo Z do Tartilope V4 por meio das portas RD0 e RD1.

O microcontrolador compara o sinal de tensão na porta AN0 (valor atual da DBCP) com o valor de referência (set point) ajustado anteriormente ao início da soldagem. Se o valor na porta AN0 supera o valor de referência, o microcontrolador eleva sua porta de saída “RD1” para “nível 1” e o optoacoplador “4N25”, com função de isolador, satura o seu transistor interno, acionando o botão Z-. Ou seja, se a DBCP lida é maior que a desejada, o microcontrolador aciona o botão manual de descida do eixo “Z” de maneira a corrigir o erro.

Entretanto, se o sinal de tensão em AN0 ficar abaixo do valor de referência, o microcontrolador aciona o botão Z+, elevando a porta RD0 para “nível 1”. Ou seja, se a DBCP lida é menor que a desejada, o controlador aciona o botão de subida do eixo Z corrigindo o erro.

Dois led’s localizados na parte frontal do equipamento indicam ao operador quando os botões Z- e Z+ estão sendo acionados automaticamente (Figura 57).

As chaves representadas como Z+ e Z- são as mesmas do controle manual do Tartilope V4, conforme mostrado na Figura 30b. Na lógica de programação criada os botões Z+ e Z- podem ser acionados ao mesmo tempo e o acionamento manual dos mesmos tem prioridade de acionamento.

O programa gravado no PIC para este fim pode ser visualizado no Apêndice I.

#### 4.1.3 Elementos de fixação das juntas (“cachorros”).

No trabalho de Scotti et al. (2013), foi utilizado como sistema de fixação dos tubos, pequenos dispositivos (“cachorros”) com 15 mm de comprimento, fabricados a partir de cantoneiras de 1/2”x1/8” (Figura 63a). Uma das funções dos cachorros foi garantir que a junta estivesse livre de obstruções de forma a não afetar o arco, como poderia ocorrer se fossem utilizados pontos de solda.

Como pode ser verificado na Figura 63b, as cantoneiras com dimensões de 1/2”x1/8” alterou a zona afetada pelo calor (ZAC) quando o arco elétrico passa sobre os dispositivos, ocorrendo uma espécie de estreitamento localizado.

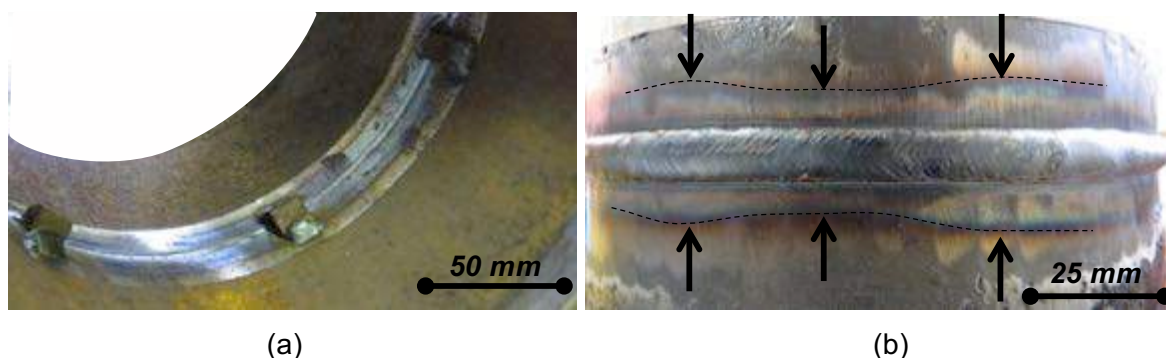


Figura 63. Detalhe do (a) sistema de fixação (“cachorros”) com cantoneiras 1/2x1/8” e (b) estreitamento da ZAC em função da presença deste sistema (SCOTTI ET AL, 2013)

Dessa forma, com o objetivo de eliminar visualmente o estreitamento localizado partiu-se para a tentativa de solução mais rápida e com menores custos. Assim, optou-se por utilizar cantoneiras de maiores dimensões (1”x3/16” e 10 mm de comprimento), com o intuito de aumentar a distância da área de contato entre o “cachorro”, zonas fundidas e afetada pelo calor (ZAC) sem perder a rigidez da fixação entre os tubos, podendo assim, diminuir o contato direto com as áreas mais aquecidas e consequentemente a absorção de calor pelo “cachorro”.

Outro ponto a ser melhorado são os ponteamientos dos cachorros. Na Figura 63a pode ser observado uma grande quantidade de metal de adição usado para a fixação do cachorro e de sua sobreposição na ZAC. Portanto, foi adotado a boa prática de soldar os elementos de fixação dos tubos com o mínimo de metal de adição, objetivando diminuir a quantidade de massa participativa na absorção de calor e probabilidade de sua sobreposição com a ZAC.

A solução adotada obteve bons resultados conseguindo eliminar visualmente o estreitamento localizado. O resultado pode ser observado na Figura 64.

Uma verificação qualitativa mais refinada foi realizada por filmagens termográficas, apresentadas no Item 4.4, nas quais pode-se perceber que os “cachorros” modificados para 1”x3/16” e 10 mm de comprimento não alteraram de maneira significativa a distribuição de temperatura.



Figura 64. Detalhe do sistema de fixação (“cachorros”) com cantoneiras 1”x3/16” e da área com alteração de coloração pelo efeito térmico em função desta modificação (passe de raiz)

#### 4.1.4 Eliminação de desligamento do Tartílope V4

Durante execuções de soldagens com o Tartílope V4, percebeu-se interrupções intermitentes, mais precisamente na posição vertical da meia cana (Figura 65b), ocasionando frequentemente o descarte de testes, de corpos de prova e consequentemente o aumento dos custos da pesquisa.

Segundo a ABNT NBR 5410 (2004), devem ser adotadas medidas necessárias para reduzir os efeitos das sobretensões induzidas e das interferências eletromagnéticas sobre equipamentos. Nesta mesma norma são mencionados exemplos de medidas que contribuem para esta redução. Dentre eles, é recomendado alocar os equipamentos sensíveis em relação a circuitos e equipamentos com altas correntes mantendo uma distância adequada; a separação adequada, por distanciamento ou blindagem, entre as linhas de energia e as linhas de sinal, bem como seu cruzamento em ângulo reto; e, por fim, a utilização de cabos blindados para o tráfego de sinais.

Como pode ser constatado na Figura 65a, nenhuma das recomendações apontadas pela ABNT NBR 5410 foram aplicadas. Pode-se observar que circuitos e cabos de controle estão expostos a radiações eletromagnéticas, sem proteção ou sob blindagens, cabos de força e controle instalados próximos, assim como cabos de energia cruzando com cabos de sinais.

Portanto, levantou-se a hipótese que o desligamento frequente do equipamento poderia ser gerado por interferências eletromagnéticas induzidas. Dessa forma foi proposto modificar toda a disposição dos equipamentos e realizar novas instalações da bancada, colocando em prática as observações que a Norma ABNT NBR 5410 recomenda. A bancada final foi apresentada no Item 3.1.

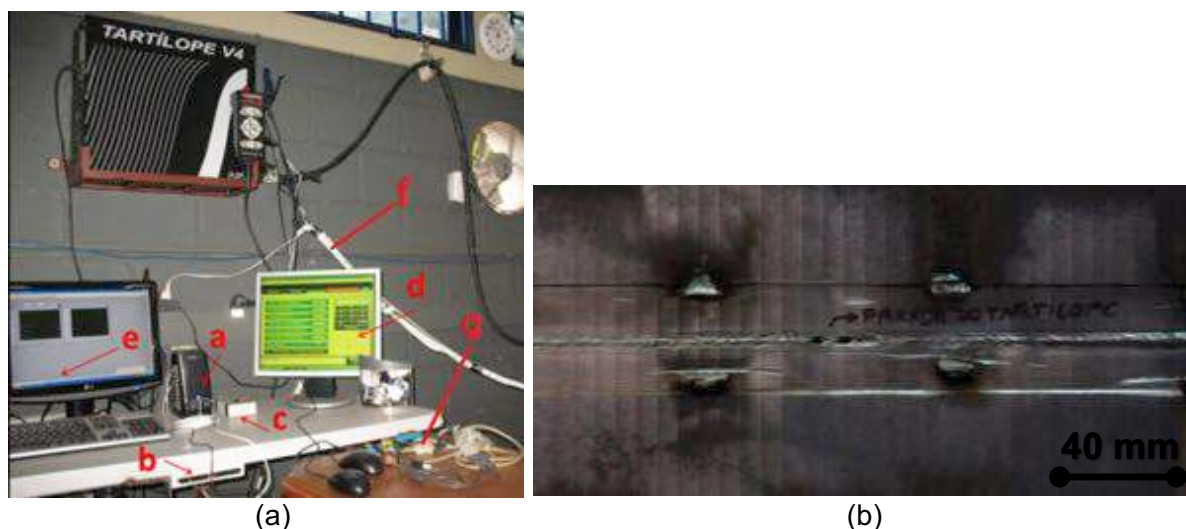


Figura 65. (a) Instalações bancada experimental anterior: a) Condicionador de sinais; b) Placa de aquisição; c) Sistema para acionamento conjunto; d) Monitor de controle do Tartilope; e) Monitor do sistema de aquisição; f) cabos de força e controle em um mesmo conduto; g) circuito de controle exposto (MAGALHÃES, 2012); (b) Corpo de prova com perfuração da raiz ocasionada pela parada repentina do Tartilope V4

Após a montagem da bancada final e de testes realizados, o mesmo defeito intermitente de desligamento do equipamento que movimenta a tocha voltou a persistir. Então, foi proposto uma investigação para eliminar a falha.

Depois de realizar testes sem ignição do arco elétrico, notou-se que quando o carrinho passa pela posição vertical, é gerado um ruído ocasionado pelo atrito entre a cinta e as rodas do carrinho. Dado o acontecimento, é levantado a hipótese de que o carrinho solicita potência do circuito de força para vencer o atrito, elevando assim a intensidade do campo eletromagnético ao entorno do cabo de força. Este fato pode causar interferências, que antes não existiam, nos cabos de controle ou de alimentações próximos.

Assim sendo, é constatado nas instalações mostradas na Figura 66, que o cabo de controle ou alimentação mais próximo ao cabo de força que solicita a sobrecorrente, é o cabo de sinal e alimentação do sensor *laser* (Figura 66b). É verificado que o cabo do sensor *laser* é blindado.



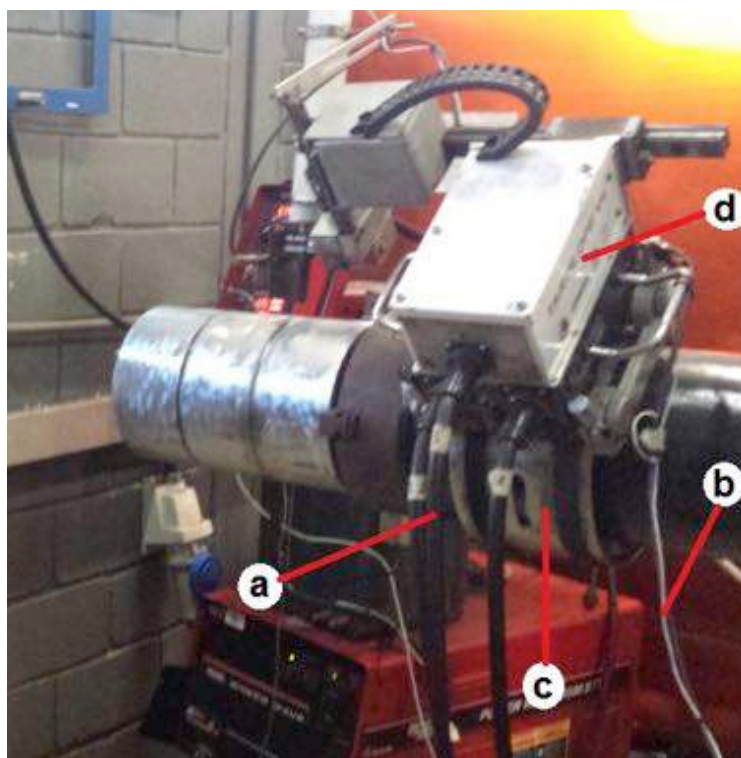


Figura 66. Disposição entre cabos de força e controle em novas instalações: (a) cabo de força de alimentação do carrinho; (b) cabo de alimentação do sensor *laser*; (c) cinta guia e de suportaço do carrinho de movimentação da tocha; (d) carrinho suporte de movimentação da tocha

Dessa forma, o primeiro passo foi realizar diferentes testes, sem ignição do arco elétrico e com o controle automático da DBCP desativado. Verificou-se que em nenhum dos testes o equipamento apresentou o defeito intermitente. Assim sendo, ativou-se o controle automático da DBCP e distanciou-se gradativamente o cabo de sinal do sensor *laser* em relação ao cabo de força. Constatou-se que a uma distância de aproximadamente 1,0 m o defeito era eliminado.

Finalmente, após fixar o cabo de alimentação do sensor a uma distância acima de aproximadamente 1,0 m em relação ao cabo de força, foram realizados testes de soldagem (presença de arco elétrico) e atestou-se a eliminação do defeito.

Após solucionar o defeito, pode-se levantar a hipótese que a interferência eletromagnética gerada pelo cabo de força, poderia induzir uma corrente ou sobressinal no cabo de controle, sendo passível de interpretação do controle automático da DBCP, uma possível correção da DBCP em uma taxa de tempo muito reduzida. Esta correção instantânea pode ser interpretada pela CPU do Tartilope como um defeito e por precaução ativa alguma proteção de desligamento no Tartilope V4.

Ainda que não seja possível comprovar com plena certeza a razão pela qual fundamenta a eliminação do defeito, pois não foram realizadas mensurações de níveis de ruídos eletromagnéticos durante o exame, atesta-se a veracidade da hipótese de desligamento causados por interferência eletromagnética, pela eliminação do defeito.

Lembrando que, o desafio neste trabalho para eliminar o defeito intermitente tem por objetivo diminuir os custos desta pesquisa. Não sendo elemento de estudo e comprovação dos fenômenos envolvidos.

## 4.2 Cálculo entre velocidade de soldagem e velocidade de alimentação

A necessidade de manter a mesma taxa de deposição de material de adição na junta, se fez necessário estabelecer uma relação entre a velocidade de alimentação de arame e velocidade de soldagem.

A relação entre  $V_a$  (velocidade de alimentação) e  $V_s$  (velocidade de soldagem) foi encontrada experimentalmente por Magalhães (2012) para o passe de raiz (Eq. 19). Segundo Magalhães (2012), conhecendo-se o diâmetro do arame, a velocidade de alimentação, e a seção transversal desejada a ser soldada, pôde-se determinar a velocidade de soldagem para o passe de raiz.

$$V_s = \frac{\pi D^2}{4 \times A_s} V_a \quad (19)$$

Onde, “D” é o diâmetro do arame, “ $A_s$ ” é a área da seção transversal do chanfro, “ $V_a$ ” é a velocidade de alimentação e “ $V_s$ ” a velocidade de soldagem.

Como pode ser visto na Figura 67, considerando-se a seção transversal da junta estudada formada por um retângulo de área  $3 \text{ mm}^2$  e um trapézio com base maior (B) de  $6,75 \text{ mm}$  e base menor (b) de  $3,00 \text{ mm}$  e portanto uma área de  $34,13 \text{ mm}^2$ , o preenchimento total da junta será de  $37,13 \text{ mm}^2$ .

Magalhães (2012) considerou que para o preenchimento de uma área de seção transversal da junta igual a 50% do seu total ( $\text{Área 1} + \text{Área 2} = 37,13 \text{ mm}^2$ ), o efeito de desvio do cordão (*humping*), que caracteriza o desvio lateral do arco, é minimizado. Para valores maiores que 50% de preenchimento, foi observado maior ocorrência de falta de penetração em virtude ao que parece do efeito de sobreposição da poça de fusão. Portanto, no presente trabalho, a área máxima da seção transversal do chanfro preenchida no passe de raiz foi fixada como sendo  $18,56 \text{ mm}^2$  e  $V_a/V_s$  igual a 16,42 (correspondente a 50% da área preenchida) para efeitos de cálculos.



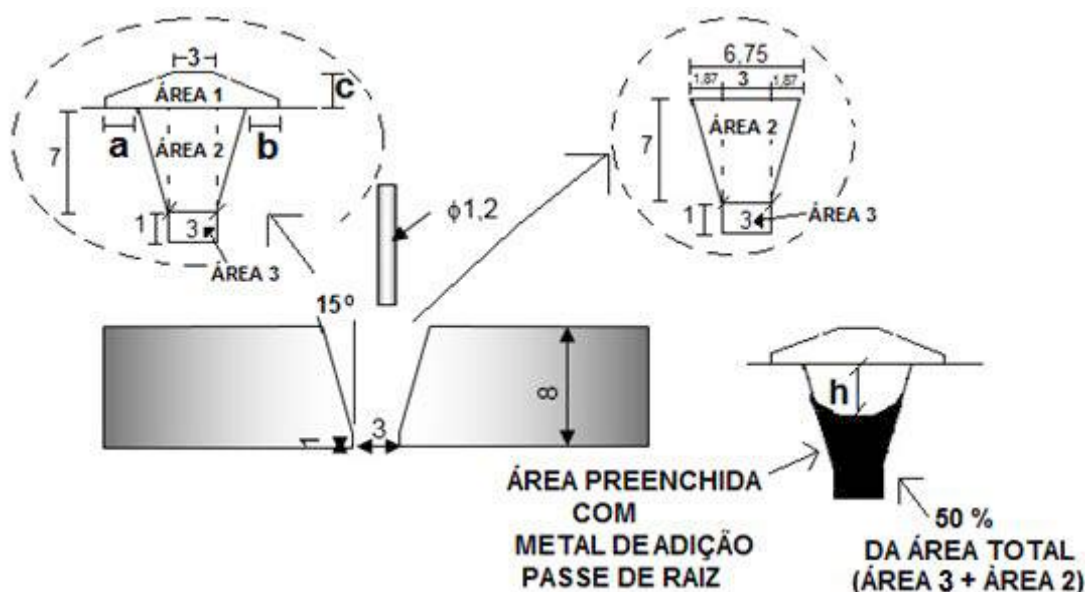


Figura 67. Representação da geometria do chanfro utilizado (dimensões em mm)

Assim como para o passe de raiz, o cálculo da velocidade de soldagem para o passe de enchimento foi baseado na Eq. 19. Para tal é necessário calcular a área da seção transversal restante a ser preenchida. A Norma API 1104 (2010) sugere o valor do parâmetro “c” variando até 3,0 mm acima do material de origem (Figura 67), mas não menciona os valores de “a” e “b”. Para efeito de cálculos serão considerados os valores de “a”, “b” e “c” como sendo de 1,6 mm.

Fazendo-se uma aproximação da seção transversal do reforço como sendo a área de um trapézio e considerando o máximo valor para o parâmetro “c”, tem-se:

$$\text{Area 1} = \frac{(B+b) \times h}{2} = \frac{[(6,75+1,6+1,6)+3] \times 1,6}{2} = 10,36 \text{ mm}^2 \quad (20)$$

A área entre a superfície superior da raiz e a superfície externa do cordão de enchimento é função da altura “h”. Fazendo-se a mesma analogia a um trapézio, a superfície exterior ao duto do passe de raiz pode ser representada pela base menor do trapézio (“b” na Eq 21) e pode ser calculada conforme Eq. 21.

$$b = -0,536 \times h + 6,751 \quad (21)$$

$$A_h = \frac{(B+b) \times h}{2} = \frac{(6,75 + b) \times h}{2} \quad (22)$$

Isto posto, a área total da seção transversal a ser preenchida durante a execução do passe de enchimento é dada pela Eq. 23.

$$A_s = \text{Área 1} + A_h \quad (23)$$

Substituindo-se o resultado da Eq. 23 na Eq. 19 e determinando-se um valor para  $V_a$  (velocidade de alimentação), obtém-se o valor da velocidade de soldagem para manter a mesma taxa de deposição no passe de enchimento.

Os valores encontrados por meio da Eq. 19, tanto para o passe de raiz como para o passe de enchimento, serviram como ponto de partida e de referência, mas poderão ser modificados pois cada processo de soldagem têm sua particularidade.

Além disso, a velocidade de soldagem calculada por meio da Eq. 19 necessita de correção, pois, a velocidade parametrizada no sistema de controle (console) do Tartilope V4 não é a velocidade real.

Para tanto, realizou-se calibração do Tartilope V4 utilizando-se cronômetro e régua de aço. Determinou-se que, para encontrar o valor real de velocidade do Tartilope V4, basta dividir o valor parametrizado no console por 1,277 (fator de calibração). No presente trabalho serão apresentados os valores reais de movimentação do carrinho para a velocidade de soldagem.

#### **4.3 Testes preliminares de passe de raiz com parâmetros pré-qualificados**

Neste item são realizados testes preliminares na soldagem de dutos para o passe de raiz. Como dito anteriormente, o passe de raiz é o primeiro a ser depositado na soldagem orbital e geralmente é o passe mais crítico, difícil de realizar. Este passe ainda determina a velocidade de execução do projeto de união de juntas (VARGAS ET AL, 2014). Portanto, a execução de testes preliminares com parâmetros pré-qualificados para o passe de raiz auxilia na diminuição do tempo e consequentemente nos custos.

O objetivo destes ensaios preliminares, utilizando-se parâmetros pré-qualificados, foi, além de verificar se os parâmetros atendem a presente pesquisa para o passe de raiz, verificar o funcionamento de toda bancada experimental.

A condição para o passe de raiz para cada processo GMAW utilizado (convencional e STT) foi estabelecida com base nos estudos realizados por Scotti et al. (2013). Ressalta-se que o chanfro (sem Hi-Low e sem cobre junta), diâmetro do tubo e espessura são iguais. Portanto, a configuração da junta aqui utilizados são os mesmos definidos no Item 3.2.7.

Estes parâmetros devem ser robustos o suficiente para atender as necessidades da posição 5G de soldagem, ou seja, em um primeiro momento produzir um cordão de solda sem imperfeições visuais e com espessura (correspondente a aproximadamente 50% da área preenchida) suficiente para suportar o passe seguinte (passe de enchimento), sem furar.

Os parâmetros mantidos fixos durante a execução das soldas preliminares foram: gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> com vazão de 15 l/min, distância bico contato peça (DBCP) de 12 mm e eletrodo ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro e inclinação da tocha em 0°.

#### 4.3.1 Processo de soldagem curto-circuito convencional

No processo de soldagem convencional, as variáveis determinadas por Scotti et al. (2013) e aqui testadas tem como parâmetro de regulagem a velocidade de alimentação do arame, a tensão de soldagem, a indutância, dentre outras, que influenciam na transferência por curto-circuito. Os valores utilizados durante as soldagens são mostrados na Tabela 15. Uma vez que Scotti et al. (2013) não mencionaram a amplitude de tecimento, utilizou-se amplitude de 3 mm ( $\pm 1,5$  mm) para garantir que o arco não se apague, já que a abertura do chanfro é de 3 mm.

Com os parâmetros discriminados na Tabela 15 não foi possível executar nenhum cordão de solda completo, sendo todos descartados após cinco tentativas. O motivo do descarte foi o preenchimento de quase que a totalidade da junta soldada pelo metal de adição (Figura 68). Assim sendo, novos ensaios para encontrar parâmetros ideais para o passe de raiz devem ser realizados. Essa característica já adianta a dificuldade a ser vencida na parametrização do processo GMAW por curto-circuito convencional e será discutida com maiores detalhes nos resultados apresentados no Item 5.2.

Tabela 15. Parâmetros de soldagem para o passe de raiz no processo convencional

Velocidade de alimentação [m/min]	Velocidade de soldagem [cm/min]	Frequência de tecimento [Hz]	Parâmetros característicos
5,00	31,0*	3,2	Tensão=19,0 V; Indutância=40%

\*A velocidade de soldagem parametrizada no console do Tartilope foi de 31 cm/min.

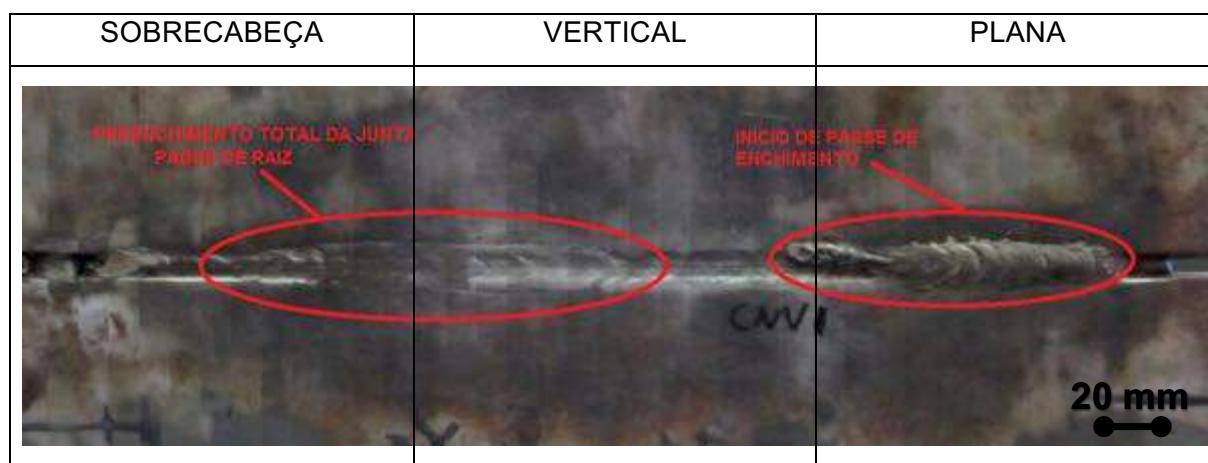


Figura 68. Ensaio com parâmetros sugeridos por Scotti et al. (2013) para o passe de raiz no processo convencional

#### 4.3.2 Processo de soldagem curto-circuito controlado (STT)

No processo GMAW derivativo (STT), as variáveis determinadas por Scotti et al. (2013) e testadas, tem como parâmetro de regulação a velocidade de alimentação, velocidade de soldagem, frequência de tecimento, corrente de pico ( $I_p$ ), a corrente de base ( $I_B$ ) e o *Tail-out*. Os valores utilizados durante as soldagens são mostrados na Tabela 16.

Tabela 16. Parâmetros de soldagem definidos por Scotti et al. (2013) para o passe de raiz no processo derivativo (STT)

Velocidade de alimentação [m/min]	Velocidade de soldagem [cm/min]	Frequência de tecimento [Hz]	Parâmetros característicos
5,75	35,0*	3,6	$I_p=350A$ ; $I_b=130A$ ; Tailout=10

\*A velocidade de soldagem parametrizada no console do Tartilope foi de 45 cm/min, considerando o fator de calibração.

As soldagens foram instrumentadas com sistema de aquisição, em conformidade com a ISO 17662 (2005), e após a soldagem os dados foram manipulados pelo programa CURTO3 (Anexo 1), onde os valores obtidos são mostrados na Tabela 17. Foram executadas um total 14 soldas com os mesmos parâmetros para verificar a robustez destes parâmetros e todos os cordões de solda foram reproduzidos com facilidade. Percebe-se que em alguns ensaios ocorreu a perfuração da raiz no início do cordão (Figura 69).

Tabela 17. Parâmetros monitorados para os passes de raiz no processo derivativo (STT)

Teste	Corrente Média [A]	Corrente RMS [A]	Tensão Média [V]	Tensão RMS [V]
STT1	229	251	16,3	17,7
STT2	232	259	15,0	17,2
STT3	223	244	17,0	18,4
STT4	232	259	14,7	16,8
STT5	233	259	14,9	16,7
STT6	223	248	15,2	17,2
STT7	231	256	14,5	16,7
STT8	226	252	15,0	17,1
STT9	230	256	14,5	16,7
STT10	232	259	14,7	16,8
STT11	235	262	14,3	16,5
STT12	226	251	15,1	17,2
STT13	231	258	14,9	17,1
STT14	234	261	14,4	16,6



Figura 69. Exemplo de perfuração inicial da raiz para dois testes preliminares (STT3 e STT7) utilizando-se o processo derivativo (STT)

Os valores obtidos foram aproximados ao valor encontrado por Scotti et al. (2013), no qual, o valor de tensão média, tensão RMS, corrente média, e corrente RMS foram respectivamente 15,4 V; 17,4 V; 220 A e 246 A. Portanto, o sistema de aquisição que foi calibrado em projetos anteriores (MACHADO, 2011 e MAGALHÃES, 2012) encontra-se em perfeitas condições de utilização.

Como todos os testes foram realizados com tecimento, quando o arco se apaga no momento da perfuração, logo o arame toca o nariz da junta, causando a re-ignição do arco. Scotti et al. (2013) não mencionou a amplitude de tecimento e assim como utilizado no processo curto-circuito convencional utilizou-se amplitude de tecimento em 3 mm ( $\pm 1,5$  mm).

Ao realizar análise visual nos cordões obtidos, foi possível observar nas primeiras soldas que o arame se prende ao final do cordão de solda ao interromper o processo. Assim sendo, em adição ao parâmetro indicado na Tabela 16, utilizou-se o *Burnback Time* igual a 0,03 s. Este parâmetro retarda o tempo de extinção do arco no momento em que é enviado o comando para a fonte de soldagem finalizar o processo, consumindo parte do arame que porventura poderá solidificar junto ao cordão de solda.

Inicialmente para ignição do arco utilizou-se uma pequena chapa em função da maior energia imposta (pelo fato da maior velocidade de alimentação e consequentemente da corrente). Essa pequena chapa, que é posicionada no início do cordão para a abertura do arco, se funde e induz a formação de uma poça de fusão estável. Assim, quando a tocha vai se deslocando para a realização da solda e a poça sai de cima da chapa, a poça desce em relação à superfície externa do tubo, o que pode ter ocasionado a perfuração da raiz (MAGALHÃES, 2012).

Dessa forma, este defeito pode ser corrigido iniciando a soldagem da raiz com a DBCP em 14 mm como forma de diminuir a energia imposta e acionando o controle automático de ajuste da DBCP (ajustado em 12 mm) após 3 segundos do início da soldagem. O momento tem um som característico e é percebido pelo operador. Caso venha ocorrer a perfuração da raiz o operador deve aumentar a DBCP por meio do controle manual e logo em seguida acionar o controle automático. Assim, em função dessa dificuldade de início de processo, conclui-se pela dificuldade na abertura do arco.

Aumentando-se a DBCP de forma que a corrente caia (fonte de tensão constante) e a energia imposta diminua, o que proporcionaria pequeno aquecimento das laterais da junta, a tendência é causar a falta de fusão e não irá caracterizar uma solda em um único conjunto de parâmetros.

Afim de sanar este problema no processo derivativo utilizado (STT) para configuração de junta proposta, a partir do Teste STT7, adotou-se a boa prática de entortar a ponta do arame em 3 mm formando um ângulo de 90° antes de iniciar os testes. A técnica

se mostrou eficiente, a abertura do arco ocorreu de maneira suave e não apresentou perfurações na raiz. A Figura 70 apresenta o cordão de solda para o passe de raiz executado com este procedimento.

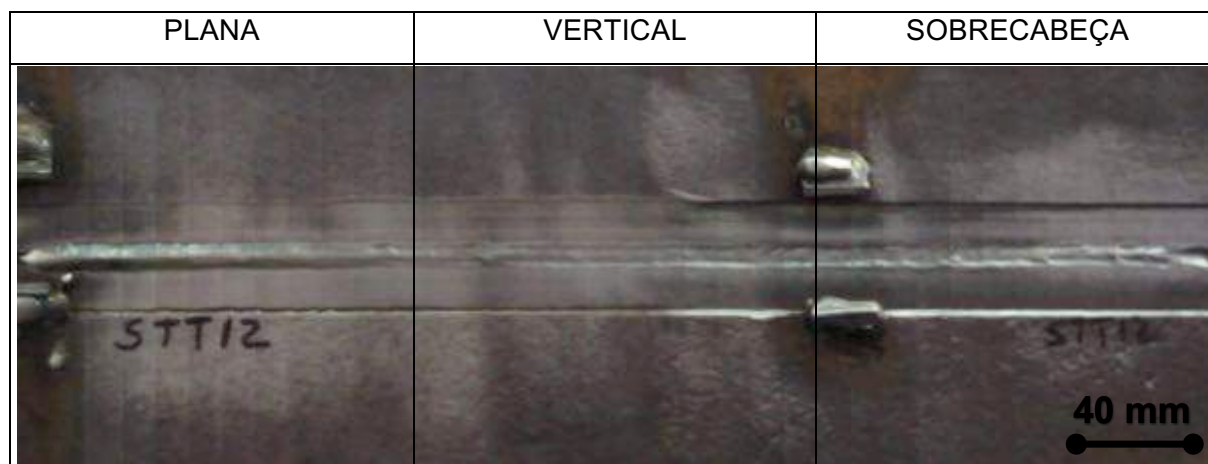


Figura 70. Aspecto visual do cordão de solda para o passe de raiz executado entortando o arame em 3 mm para o Teste STT12

Assim, o conjunto de parâmetros encontrado está apto em um primeiro momento para a aplicação desta pesquisa, pois a solda está de acordo com as exigências de inspeção visual da API 1104 (2010), estando livre de trincas, mordeduras e penetração inadequada. A penetração na posição plana, vertical e sobrecabeça para a solda STT12 foram respectivamente: 1,60 mm; 0,20 mm e 0,10 mm.

Neste conjunto de testes preliminares não será analisado critérios de porosidade e falta de fusão, pois, o objetivo destes testes é encontrar um parâmetro para raiz. A análise por macrografia do passe de raiz será realizada em conjunto com o passe de enchimento.

A Figura 40 apresenta o aspecto do cordão de solda (face superior) executado com o conjunto de parâmetro encontrado. Foram realizadas medições e nota-se que nas posições planas e vertical o passe de raiz conseguiu-se aproximadamente 60% de preenchimento da junta, já para a posição sobrecabeça o preenchimento foi de aproximadamente 70% da junta soldada.

Dessa forma, o funcionamento das fontes e do sistema de aquisição encontram-se em bom funcionamento e os parâmetros do passe de raiz identificados atendem de forma inicial a condução das soldagens com GMAW curto-circuito controlado (STT).



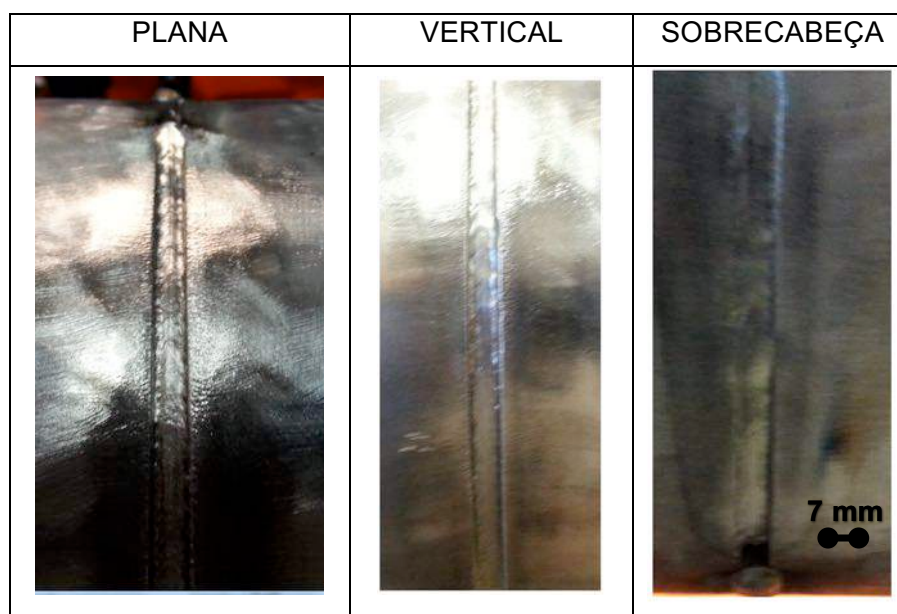


Figura 71. Aspecto visual do cordão de solda para o passe de raiz (face superior) executado entortando o arame em 3 mm (Teste STT12)

#### 4.4 Avaliação qualitativa por termografia

Neste item são apresentados testes preliminares para avaliar qualitativamente o decaimento de temperatura em ambos os lados das juntas soldadas. Estes testes foram motivados pela montagem de uma nova bancada experimental, pela elevada frequência de falta de fusão lateral em cordões de soldas presentes em resultados anteriormente investigados pelo Grupo Laprosolda e para garantir que o sistema montado não interfere nas soldagens.

Na análise de transferência de calor, a difusividade térmica mensura a capacidade do material de conduzir energia térmica em relação a sua capacidade de armazená-la, ou seja, expressa quão rapidamente um corpo se ajusta por inteiro à temperatura de seu entorno (no caso, o material na vizinhança da solda). Materiais com valores elevados de difusividade térmica aquecem e resfriam com maior rapidez, isto é, a energia imposta em materiais com difusividade muito alta é utilizada em grande parte para aquecer a chapa ou tubo teste e dificultando a fusão do metal de adição. Assim sendo, a energia imposta no duto teste deve ser suficiente para fundir o metal de adição, aquecer o metal de base para aumentar a molhabilidade e evitar a falta de fusão. Conforme apresentado na Eq. 24, a difusividade é dependente da massa específica dos materiais envolvidos.



$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (24)$$

Onde, “ $\rho$ ” é a massa específica do material, em kg/m<sup>3</sup>, e “ $C_p$ ” o calor específico, em J/kg.K e “ $k$ ” é a condutividade térmica do material, em W/mK.

Considerando um baixo valor de capacidade térmica volumétrica ( $\rho C_p$ ) para um dado material, significa um tempo menor para o sistema alcançar equilíbrio, ou seja, o sistema tem uma baixa inércia térmica. Desta maneira, para uma mesma energia imposta a variação da massa específica ou material em um dos lados da junta pode contribuir na formação da falta de fusão lateral.

Por convenção, será denominado de “Lado da suportaçoão” o lado do duto teste que é fixo na castanha e “Lado do tubo” o lado que não é suportado. O que separa o “Lado da suportaçoão” do “Lado do tubo” é o chanfro. A partir dessa convenção, é possível observar na Figura 72 que a concentração de massa (aço) é maior em um dos lados da junta (“Lado da suportaçoão”), provocando a perda de calor por condução do tubo teste para a mesa posicionadora, fato que pode contribuir para a falta de fusão lateral. Além do mais a massa específica dos materiais que compõem a mesa posicionadora é desconhecida (lado suportaçoão), existindo a hipótese da difusividade de ambos os lados da junta ser diferente.

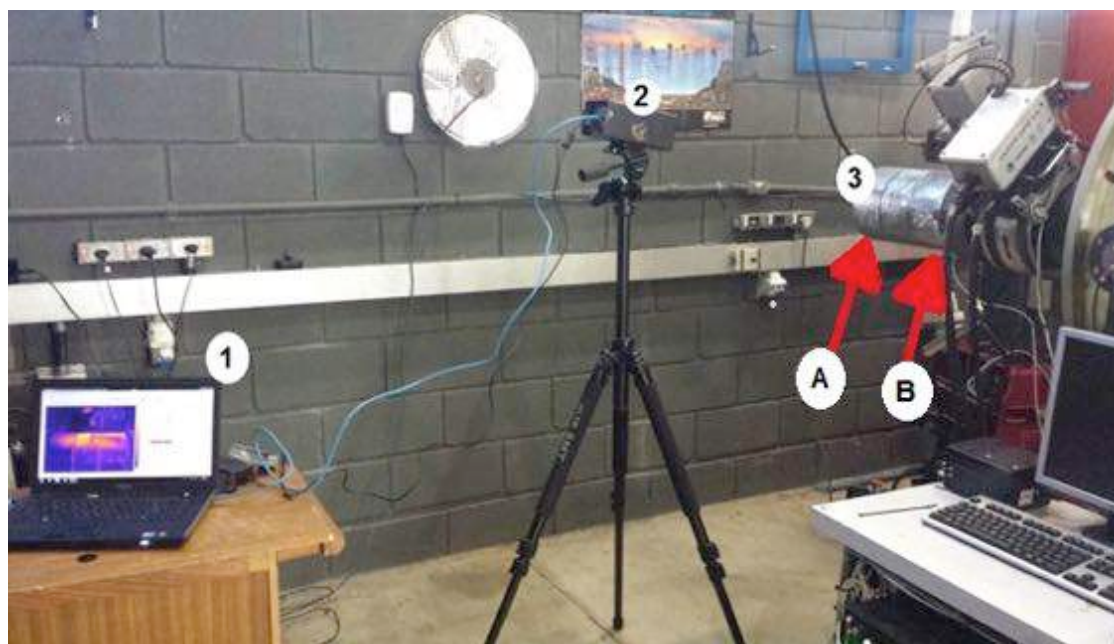


Figura 72. Bancada experimental para filmagem termográfica da soldagem, sendo: 1. Interface de manipulação da câmera termográfica (laptop); 2. Câmera termográfica FLIR A325; 3. Tubo teste; B: Lado suportaçoão e A: Lado do tubo

Além disso, para um mesmo conjunto de parâmetros pode-se dizer que o primeiro cordão de solda executado no corpo de prova proposto terá menor probabilidade de apresentar descontinuidades devido à baixa difusividade entre os tubos, uma vez que estarão interligados apenas em determinados pontos por meio de “cachorros”. Em contrapartida, o quarto cordão de solda poderá ser o mais crítico, ou seja, com maior probabilidade de apresentar descontinuidades, pois, antes da execução deste último cordão de solda os tubos já estarão unidos por outros três cordões de solda, aumentando assim a superfície de contato e conseqüentemente a rapidez com que o calor se difunde entre os tubos e o ambiente. Portanto, o quarto cordão de solda deste tubo teste poderá necessitar de uma energia de soldagem maior do que ao transmitido no primeiro cordão de solda para evitar uma possível falta de fusão.

Para determinar se essas características térmicas ocorrem realmente, foram realizadas soldagens em tubos testes, observando-se o regime térmico com uso de uma câmera termográfica com o intuito de analisar a variação da temperatura em pontos simétricos do corpo de prova. O conjunto de parâmetros escolhidos foi baseada no primeiro cordão que não apresentou descontinuidades externas ao ser avaliado visualmente, mas não garante que internamente tenha descontinuidades.

A bancada experimental montada para a execução de testes preliminares e o posicionamento da câmera termográfica é apresentada na Figura 72. Os outros equipamentos necessários para a execução da soldagem são descritos no Item 3.1.

Os parâmetros utilizados nos testes são apresentados na Tabela 18. O arame eletrodo utilizado foi o AWS ER 70S-6 com diâmetro de 1,2 mm, DBCP de 12 mm, gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> com vazão de 15 l/min, inclinação da tocha em 0°, *Burnback time* de 0,03 s.

Tabela 18. Parâmetros do processo derivativo (STT) para ensaios de termografia

Passe	Va (m/min)	Vs (cm/min)	Amplitude de tecimento (mm)	Frequência de tecimento (Hz)	Ib (A)	Ip (A)	Tout
Raiz	5,75	35*	3	3,6	130	350	10
Enchimento	4,20	22,7*	5	2,4	130	330	8

\*A velocidade de soldagem parametrizada no console do Tartilope é dada por  $Vs \cdot 1,277$ .

Foram realizados um total de 12 cordões de solda (6 passes de raiz e 6 passes de enchimento) em dois tubos testes, sendo um deles montados com 3 tubos e outro com 2 tubos. Posteriormente, os arquivos de gravação cedidos pela câmera termográfica foram decodificados e analisados com o auxílio dos softwares Matlab® e OriginPRO®.

Dessa forma, esta etapa do trabalho consiste em analisar qualitativamente a diferença no decaimento ou crescimento de temperatura em pontos simétricos do tubo teste (lado tubo e lado suportação) por meio de gráficos, de forma a verificar se a diferença de massa e parâmetros desconhecidos (massa específica entre outros) existentes em ambos os lados da instalação, contribui para a falta de fusão lateral frequente.

#### 4.4.1 Ajuste da câmera termográfica

A câmera termográfica recebe radiação do objeto filmado e da vizinhança. Segundo FLIR System (2007) as parcelas de radiações recebidas pela câmera são definidas na Eq.25. A Figura 73 mostra a representação esquemática das variáveis envolvidas na mensuração.

$$W_{total} = \varepsilon \tau W_{obj} + (1 - \varepsilon) \tau W_{refl} + (1 - \tau) W_{atm} \quad (25)$$

Onde, “ $W_{total}$ ” é a radiação total recebida pela câmera; “ $W_{obj}$ ” a emissão de radiação proveniente do objeto; “ $W_{refl}$ ” a radiação refletida pela superfície do tubo teste; “ $W_{atm}$ ” a radiação do meio de propagação; “ $\varepsilon$ ” a emitância do objeto (energia emitida pela superfície de um corpo, por segundo e por unidade de área) e “ $\tau$ ” a transmitância (fração da luz com um comprimento de onda específico, que atravessa uma determinada matéria).

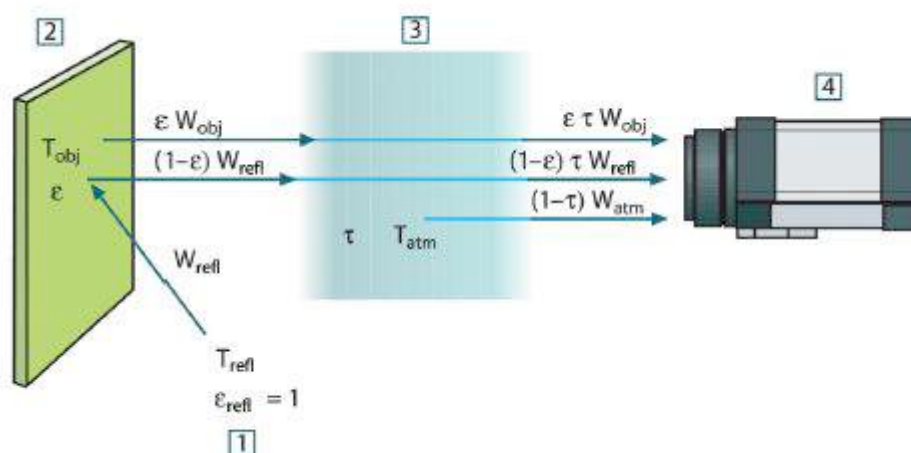


Figura 73. Representação esquemática de medições de temperatura por infravermelho. 1: Vizinhança; 2: Tubo teste/objeto; 3: Atmosfera; 4: Câmera. (ADAPTADO DE FLIR SYSTEM, 2010)

A câmera termográfica recebe uma radiação “Wtotal” à uma temperatura T em curtas distâncias e gera um sinal de saída Ufonte que é linearmente proporcional ao sinal de entrada. Assim sendo, tem-se que:

$$W_{total} = CU_{fonte} \quad (26)$$

Substituindo a Eq. 26 na Eq. 25, tem-se:

$$U_{total} = \varepsilon\tau U_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau U_{refl} + (1 - \tau)U_{atm} \quad (27)$$

Ameloti et al. (2014) assumiram que as tensões monitoradas e teóricas são linearmente proporcionais às temperaturas (T) envolvidas. Assim, é possível escrever que:

$$T_{obj} = \frac{1}{\varepsilon\tau} T_{total} - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} T_{refl} - \frac{1-\tau}{\varepsilon\tau} T_{atm} \quad (28)$$

Dessa forma, analisando-se a Eq. 28 é possível determinar a temperatura do objeto conhecendo-se as temperaturas de entrada (convertidas em sinal de tensão ou corrente pela câmera), e a emissividade do material e a transmitância do meio. Nota-se também que a radiação refletida do meio é uma variável difícil de controlar, pois, varia com o tempo, ambiente e com o polimento superficial do tubo teste.

Com base na tabela de emissividade exibida no manual da câmera (FLIR SYSTEM, 2009) adotou-se a emissividade de 0,760 (ferro em temperatura até 538°C). Para a transmitância foi selecionada o valor padrão igual a 1. A temperatura de saturação da câmera durante as filmagens foi fixada em 510°C.

Todos os parâmetros empregados no experimento são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19. Parametrização da câmera termográfica

Emissividade	Distância entre tubo teste e câmera (m)	Temperatura da radiação refletida (Trefl.) em °C	Temperatura devido a radiação do ambiente (Tatm) em °C	Transmitância
0,760	0,85	25	33	1

Segundo Mota (2011), as imagens filmadas devem ser corrigidas conforme a inclinação da câmera fotográfica. Ameloti et al (2014) afirmam que quanto maior o ângulo de inclinação, maior será a distorção observada na imagem adquirida. Neste trabalho em particular, o eixo óptico da câmera foi ajustado, de modo a apontar diretamente para a linha

de interesse (descendente vertical do duto teste) tornando as distorções nulas. Neste caso não foi necessário planificar ou retificar a imagem.

A linha de interesse a ser analisada foi selecionada de acordo com as limitações físicas na fixação da câmera e em virtude das descontinuidades ocorrerem na posição vertical. Tais linhas de interesse são ilustradas na Figura 74 e as coordenadas consideradas no estudo são mostradas na Tabela 20.

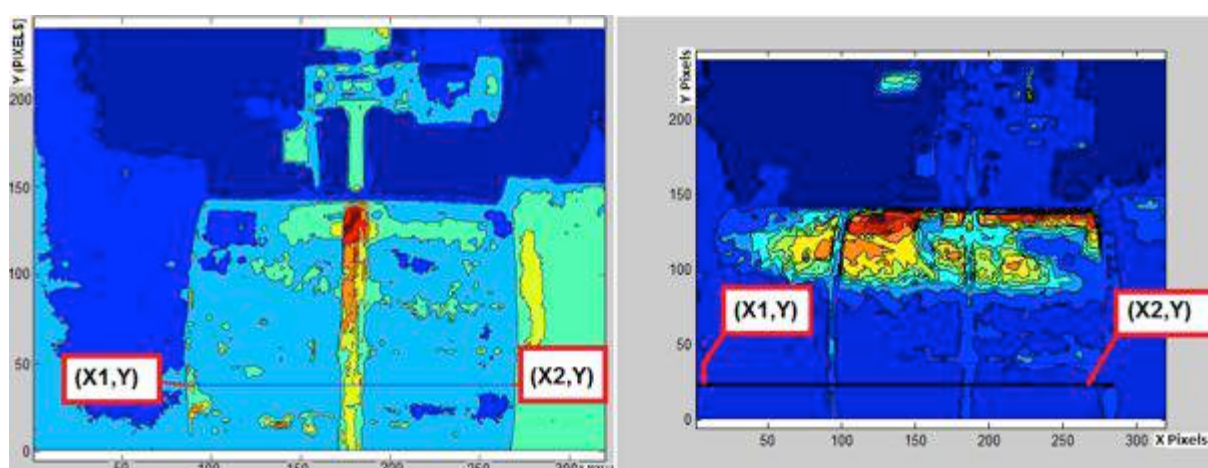


Figura 74. Linha de interesse utilizada na imagem térmica

Tabela 20. Coordenadas em pixels das linhas de referência utilizada no ensaio termográfico

Posições	2 Tubos	3 Tubos
X1	85	5
X2	269	275
Y	38	20

#### 4.4.2 Cordões de solda e dados adquiridos

A partir dos parâmetros de soldagem definidos na Tabela 18 para a presente etapa de avaliação termográfica, realizou-se as soldagens de forma a verificar os valores de corrente e tensões próximas ao trabalho de Scotti et al. (2013) e também para corroborar com as características do processo derivativo (STT) de soldagem utilizado. Como resultados são apresentados na Figura 75, os oscilogramas típicos, e na Tabela 21, os valores típicos de corrente e tensão adquiridos durante as soldagens. Os dados exibidos na Tabela 21 foram calculados usando o programa desenvolvido em Matlab® pelo Laprosolda/UFU denominado de “Curto 3” (Anexo 1).

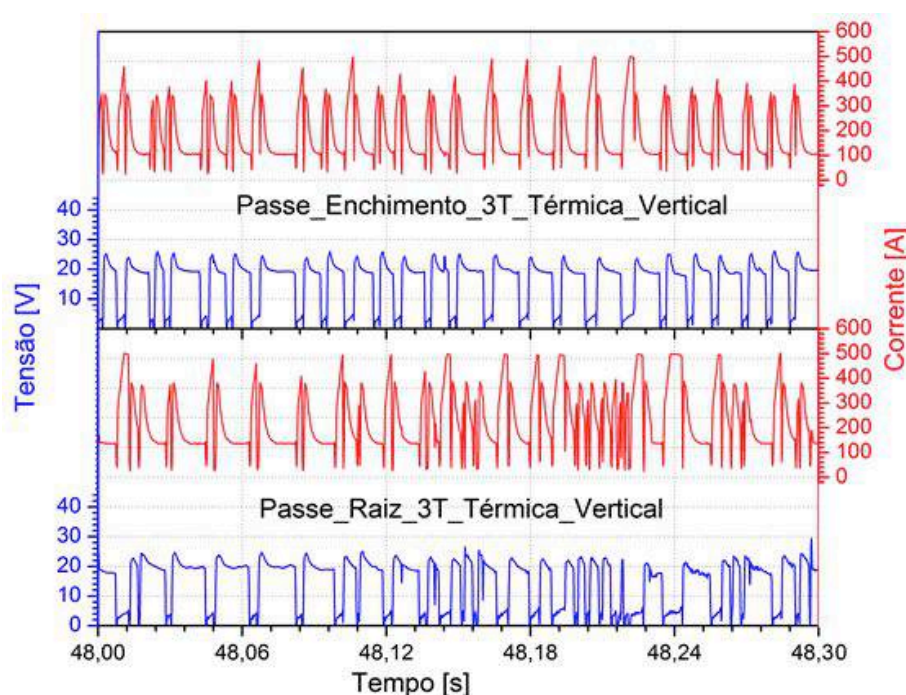


Figura 75. Oscilograma típico adquirido para o passe de raiz e enchimento utilizando o processo derivativo (STT)

Tabela 21. Valores típicos de corrente e tensão adquiridos durante a avaliação termográfica

Teste	Corrente Média [A]	Corrente RMS [A]	Tensão Média [V]	Tensão RMS [V]	Índice de Regularidade
2T_Enchimento	197	228	15,2	17,4	0,89
2T_Raiz	239	266	14,6	16,9	1,32
3T_Enchimento	200	232	15,0	17,2	0,91
3T_Raiz	227	254	15,3	17,5	1,38

A identificação dos cordões de solda segue o seguinte código: NT\_(R ou E)X, onde NT: Número de tubos, R: passe de raiz, E: passe de enchimento e X número do ensaio. Ex.: 3T\_R1 (ensaio 1 para passe de raiz com 3 tubos).

De forma geral, o oscilograma obtido se aproxima-se do gráfico conseguido por Scotti et al. (2013) para o processo de soldagem derivativo (STT) e está em conformidade com a Figura 7 apresentada no Capítulo 2. Estes resultados são satisfatórios para a análise termográfica, pois, segundo Scotti et al. (2013) a corrente média deveria ser maior que 173A para o passe de enchimento e maior ou igual a 220 A para o passe de raiz.

Por fim, destaca-se que todos os cordões de solda analisados neste pré-teste são encontrados no Apêndice VI. Na Figura 76 é mostrado um dos cordões de solda examinados.



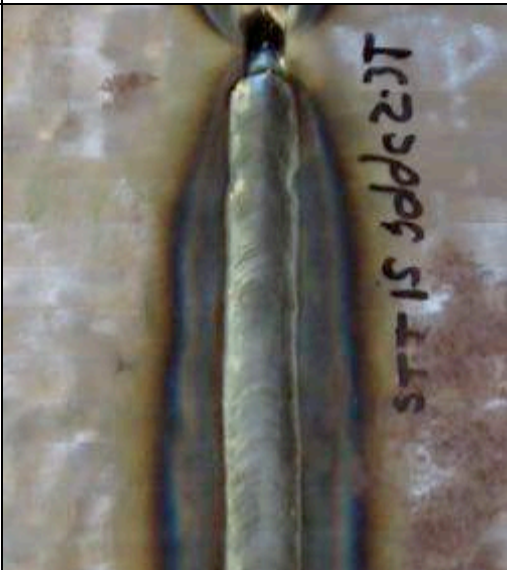



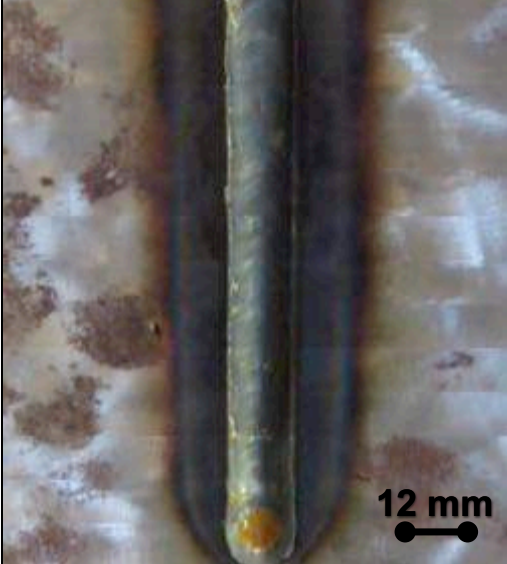
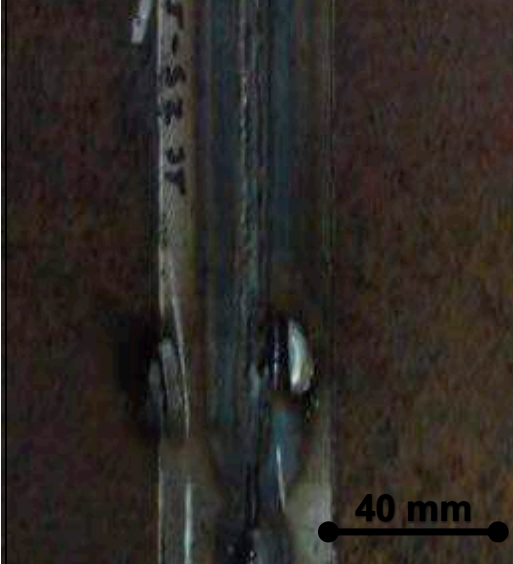
Posição	ENCHIMENTO	RAIZ
PLANA		
VERTICAL		
SOBRE-CABEÇA		

Figura 76. Cordão de solda típico fabricado em testes com câmera termográfica

#### 4.4.3 Seleção dos pontos simétricos

A câmera térmica gera dois arquivos, um com extensão “smov” e o outro “pod”. O arquivo “pod” registra informações gerais em código binário sobre a filmagem, entre eles pode-se citar o número de quadros gravados. O arquivo com extensão “smov” é o arquivo de gravação propriamente dito.

Para auxiliar nas análises das filmagens foram implementados códigos em Matlab® para decodificação das imagens em matrizes de dados numéricos, geração de filmes em 3D e geração de gráficos em função do tempo cuja coordenada da linha analisada é modificada com flexibilidade.

O código completo do programa em Matlab® é exibido no Apêndice IV. Para melhor entendimento dos procedimentos executados, este código foi fragmentado e reapresentado no Apêndice IV.

Após a fixação das linhas que serão analisadas (Tabela 20), o primeiro passo da análise é expurgar os quadros iniciais que representam a passagem da tocha na frente do cordão de solda.

A passagem da tocha que se localiza entre o cordão de solda e a câmera causam desvios significativos nos dados mensurados. Tal fato é percebido observando-se a desestabilização em sequência dos gráficos disponibilizados pelo software Matlab® durante a movimentação da tocha.

Com o auxílio do filme em 3D (gerado pelo código “Geração de filme da soldagem térmica no Matlab®”) em sincronismos com gráficos gerados a partir do código “Geração de gráficos 2d em sequência das nframes (ex. 18867 quadros)” é possível identificar os quadros iniciais da filmagem que devem ser expurgados (Figura 77).

Durante a passagem da tocha em frente a câmera térmica o gráfico é distorcido (Figura 77ab). Então, varia-se manualmente os valores extremos na função “for” (for ii=1:nframes), função esta que fixa os quadros a serem varridos, até o momento em que o gráfico se transforme em uma gaussiana (Figura 77d). O momento ideal é marcado ao ser observado a gaussiana e os valores anteriores a “nframes” devem ser expurgados.

Para diminuir o tempo de análise é recomendado parametrizar a função “pause” em 0.01 (função: pause(0.01)).

Em vista disso todos os dados anteriores a 5000 quadros foram expurgados, pois, a partir deste ponto observa-se a formação da curva gaussiana em todos os ensaios realizados.



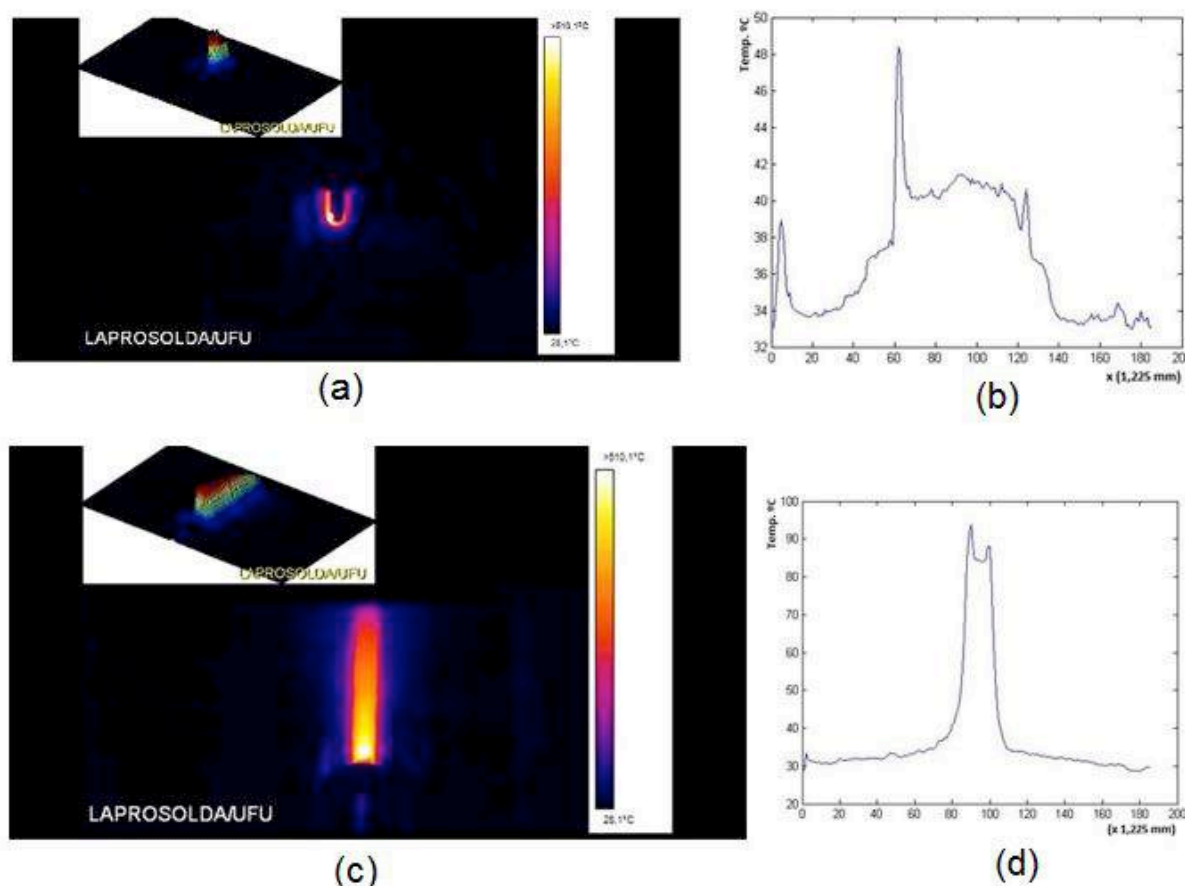


Figura 77. Sincronismo entre filmagem e gráficos gerados no software Matlab®: (a) Imagem do filme em 3D no instante da passagem da tocha em frente a câmera; (b) gráfico representando a imagem mostrada em (a); (c) Imagem do filme em 3D no instante após a passagem da tocha na frente a câmera; (d) gráfico representando a imagem mostrada em (c)

Na prática alguns pontos adquiridos pela câmera térmica foram somados as radiações térmicas refletidas, ocasionada pela incidência da luz ambiente sobre a superfície (componentes de radiação  $T_{refl}$  e  $\varepsilon_{refl}$  mostrada na Figura 73).

Confrontando o gráfico e a imagem térmica de um dos ensaios representados pela Figura 78 (a) e (b) pode-se dizer que do ponto 200 ao 275 existe uma refletância elevada provocada pelo acabamento superficial. Portanto, para análise da soldagem com 3 tubos foi necessário modificar a coordenada “Y” da linha de referência de 38 pixels para 20 pixels, devido à presença desta refletância na soldagem do passe de enchimento (ensaio 3T\_E1).

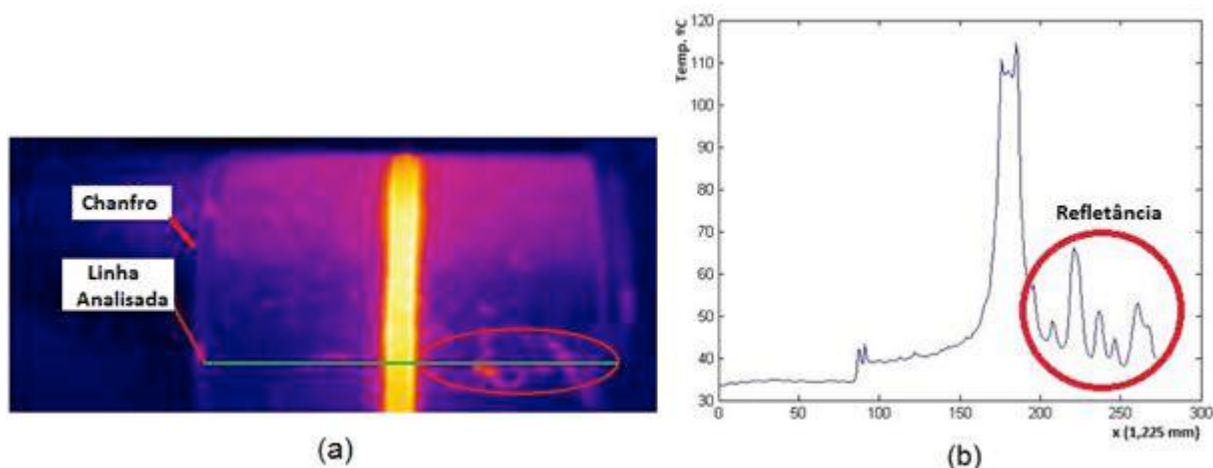


Figura 78. Imagem justificando a expurga dos dados para a refletância provocada pelo acabamento superficial; (a) Ensaio 3T\_E1; e (b) gráfico correspondente

Na Figura 79 percebe-se também que a temperatura anterior ao ponto 85 é menor, pois, os tubos estão unidos apenas por “cachorros”, o que diminui a eficiência de condução do calor para a outra parte do tubo. A fita branca, utilizada para auxiliar no controle automático da DBCP, é facilmente identificada nos gráficos de passe de raiz, assim como a presença do chanfro entre os pontos 85 e 96.

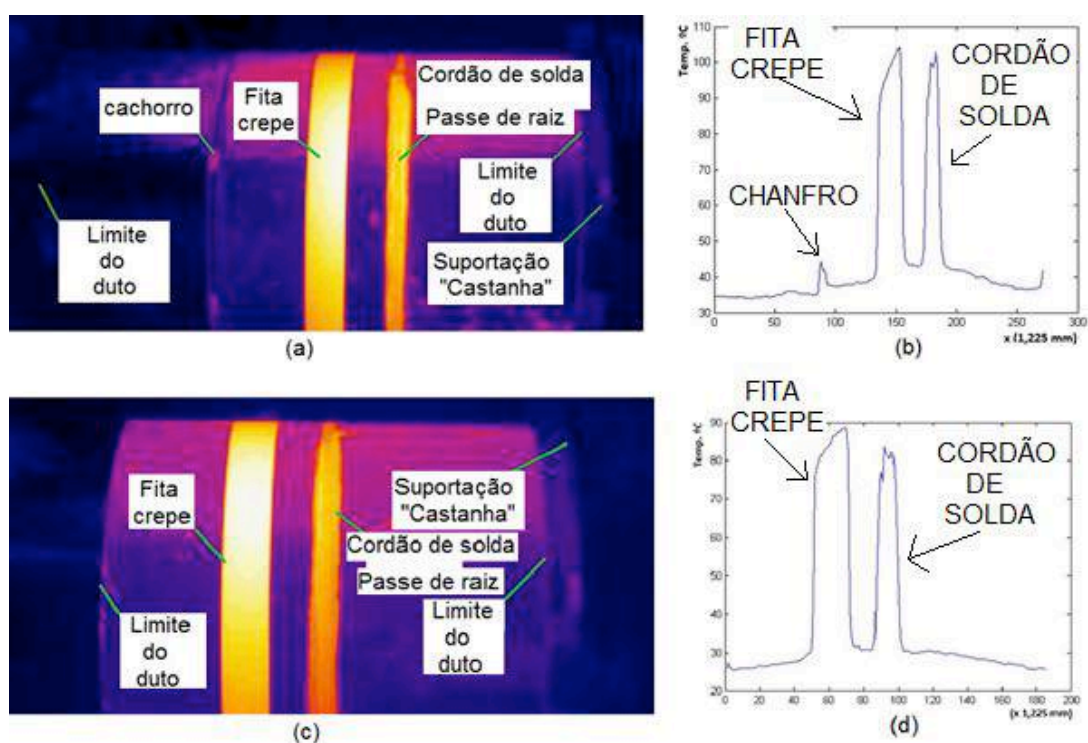


Figura 79. Imagens térmicas e respectivos gráficos processados em Matlab®: (a) ensaio 3T\_R1 e (b) seu gráfico correspondente; (c) ensaio 2T\_R2 e (d) seu gráfico correspondente

Todos os pontos que apresentam as anomalias acima, devem ser descartados em todos os ensaios realizados, pois, variam desordenadamente e não representam a variação de temperatura no duto.

O critério de escolha dos pontos para análise foi baseado na observação dos pontos do perfil de temperatura em função do tempo, todos ao mesmo tempo, durante a execução da soldagem da meia cana. Para examinar a evolução do perfil de temperatura, em todos os pontos ao mesmo tempo, utilizou-se o código em Matlab® “geração de gráficos 2d em sequência das nframes (ex. 18867 quadros)” variando a função “for ii=5000:nframes”.

Os gráficos que melhor representam a escolha dos pontos são listados no Apêndice V. Investigando os gráficos listados no Apêndice V são expurgados os dados referentes as anomalias supracitadas. As faixas de pontos expurgados são mostradas na Tabela 22.

Tabela 22. Faixa de pontos expurgados por consequência de anomalias

Ensaio	Chanfro lado esquerdo sem solda (pixels)		Chanfro lado esquerdo com solda (pixels)		Fita crepe (pixels)		Suporte (pixels)	
	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim
2T_E1	0	19	-	-	-	-	-	-
2T_R1	0	19	-	-	45	78	-	-
2T_E2	0	5	-	-	-	-	-	-
2T_R2	0	5	-	-	45	78	-	-
3T_E1	85	96	-	-	-	-	-	-
3T_R1	94	102	-	-	141	170	-	-
3T_E2	78	88	-	-	-	-	262	271
3T_R2	85	93	-	-	133	160	269	271
3T_E3	-	-	70	96	-	-	261	271
3T_R3	-	-	73	95	128	155	262	271
3T_E4	-	-	73	96	-	-	264	271
3T_R4	-	-	71	97	125	155	264	271

Posteriormente ao procedimento de expurga dos dados são selecionados os pontos para análise do decaimento ou crescimento da temperatura. A Tabela 23 discrimina todos pontos simétricos selecionados.

Tabela 23. Pontos selecionados para análise do decaimento ou crescimento da temperatura

Ensaio	Início (quadro)	Fim (quadro)	Número total de quadros gravados	Ponto central da largura cordão (pixels)	Pontos simétricos (pixels)	Coordenadas dos pontos analisados em relação ao ponto central (mm)
2T_E1	5000	11000	18861	94	(74,114); (54,134); (26;162)	0,0 (-24,5;24,5) (-49;49) (-83,3;83,3)
2T_R1	5000	11000	18478	94	(42,146); (22,166)	0,0 (-63,7;63,7) (-88,2;88,2)
2T_E2	5000	11000	18026	94	(74,114); (54,134); (26;162)	0,0 (-24,5;24,5) (-49;49) (-83,3;83,3)
2T_R2	5000	11000	18110	94	(42,146); (22,166)	0,0 (-63,7;63,7) (-88,2;88,2)
3T_E1	5000	11000	18300	180	(160,200); (140,220); (110,250)	0,0 (-24,5;24,5) (-49;49) (-85,75;85,75)
3T_R1	5000	11000	16083	190	(175,205); (130,250); (115,265)	0,0 (-18,4;18,4) (-73,5;73,5) (-91,9;91,9)
3T_E2	5000	11000	18728	174	(154,194); (134,214); (98,250);	0,0 (-24,5;24,5) (-49;49) (-93,1;93,1)
3T_R2	5000	11000	18183	180	(165,195); (120,240); (100,260)	0,0 (-18,4;18,4) (-73,5;73,5) (-98,0;98,0)
3T_E3	5000	11000	18667	175	(155,195); (135,215); (105,245);	0,0 (-24,5;24,5) (-49;49) (-85,8;85,8)
3T_R3	5000	11000	18386	175	(160,190); (115,235); (100,250)	0,0 (-18,4;18,4) (-73,5;73,5) (-91,9;91,9)
3T_E4	5000	11000	18488	175	(155,195); (135,215); (105,245);	0,0 (-24,5;24,5) (-49;49) (-85,8;85,8)
3T_R4	5000	11000	18182	175	(160,190); (115,235); (100,250)	0,0 (-18,4;18,4) (-73,5;73,5) (-91,9;91,9)

#### 4.4.4 Geração das matrizes

Uma vez definida os pontos simétricos a serem investigados, são geradas matrizes contendo a magnitude da temperatura para cada pixel em cada quadro da filmagem.

Para a geração das matrizes no Matlab® é utilizado o programa exibido no Apêndice IV “Geração da Matriz (.txt) na Linha Especificada no Intervalo de Quadros Solicitado” e logo em seguida o programa “Matriz Transposta de arquivo .txt”. Para tal deve ser atualizado as coordenadas da linha referencia (Y, X1 e X2) segundo a Tabela 20 e o comando “for ii=1:nframes” para “for ii=5000:11000” conforme a Tabela 23. A execução dos programas gera um arquivo com extensão “.txt” na pasta onde se encontra o arquivo de gravação da filmagem térmica “sfmov”.

Após a geração destas matrizes, são confeccionados gráficos da variação da temperatura em função do tempo utilizando o software OriginPRO®. Em razão do software OriginPRO® limitar a análise em até 6000 pontos, a matriz de dados gerada por meio do Matlab® foi limitada na faixa entre 5000 e 11000 pontos, apesar de existirem mais de 11000 pontos gravados. Esta escolha limite de 11000 quadros não interfere nos resultados finais, uma vez que, a análise é qualitativa.

#### 4.4.5 Técnica de geração dos gráficos - temperatura x tempo

Os arquivos gerados por meio do software Matlab® com extensão tipo texto, referem-se a magnitude da temperatura em °C da linha referência pré-selecionada, variando no intervalo de quadros anteriormente selecionados. O arquivo tipo texto é importado para o software OriginPRO® para tratamento.

Para definir a escala do eixo X é necessário definir o tempo entre quadros. Por conseguinte, com o auxílio do arquivo com extensão “pod” (que define o número de quadros gravados) e do tempo de gravação de cada ensaio é possível levantar os dados e determinar o tempo entre quadros. Os dados são apresentados na Tabela 24.

Com a finalidade de definir o tempo entre quadros, faz-se o uso das Eqs. 29 e 30.

$$\text{Tempo entre quadros} = \frac{\text{Tempo total}}{N.\text{de Quadros Gravados}} \quad (29)$$

$$N.\text{de Quadros por segundo} = \frac{1}{\text{Tempo entre quadros (s)}} \quad (30)$$

Dessa forma, para transformar em tempo real o número que identifica cada quadro, multiplica-se cada valor deste por (1/60), já que a câmera grava as imagens a uma taxa de 60 quadros por segundo. O número que identifica os pontos simétricos anteriormente selecionados e descritos na Tabela 23 pode ser vista na Figura 80 indicada como “coordenada “X” do ponto selecionado.

Para geração dos gráficos basta selecionar todos os números que identificam cada quadro (convertidos para tempo) e as linhas que correspondem aos pontos simétricos. Todos os gráficos encontram-se no Apêndice VIII.

Tabela 24. Dados de gravação

Ensaio	Nº. de Quadros Gravados	Tempo total (s)	Tempo entre quadros (s)
2T_E1	18861	314	0,01664811
2T_R1	18478	307	0,016614352
2T_E2	18026	300	0,016642627
2T_R2	18110	301	0,016620652
3T_E1	18300	304	0,016612022
3T_R1	16083	267	0,01660138
3T_E2	18728	311	0,016606151
3T_R2	18183	303	0,016663917
3T_E3	18667	311	0,016660417
3T_R3	18386	306	0,016643098
3T_E4	18488	308	0,016659455
3T_R4	18182	302	0,016609834

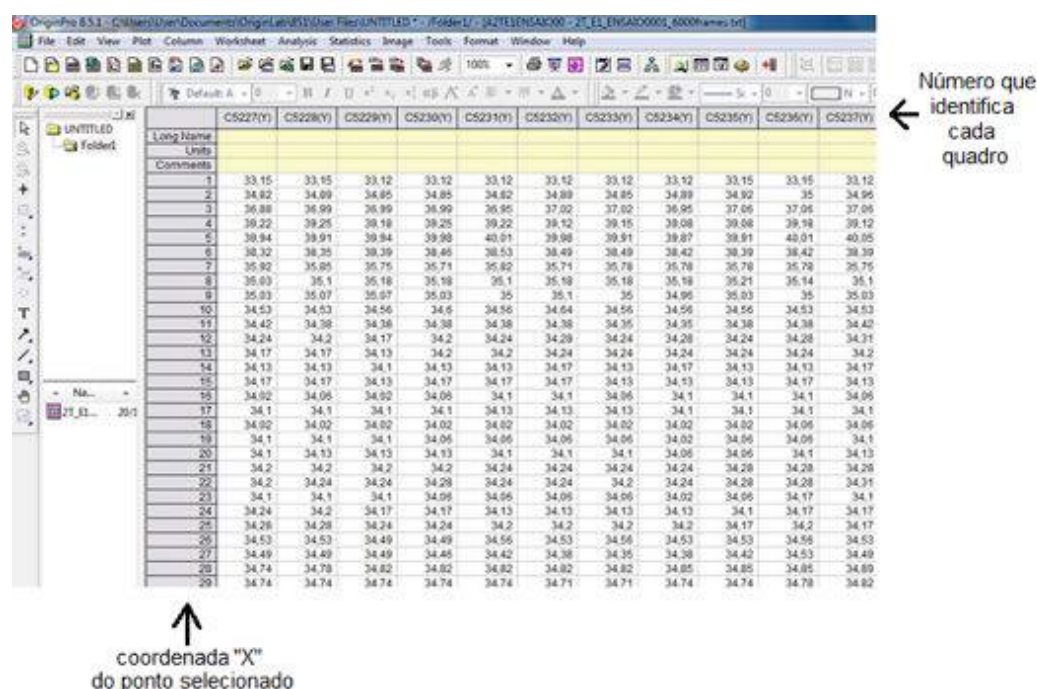


Figura 80. Ambiente do software OriginPRO® para dados importados

#### 4.4.6 Resultados

Os gráficos que melhor representam os resultados para o passe de enchimento e raiz são mostrados na Figura 81 e Figura 82, respectivamente.

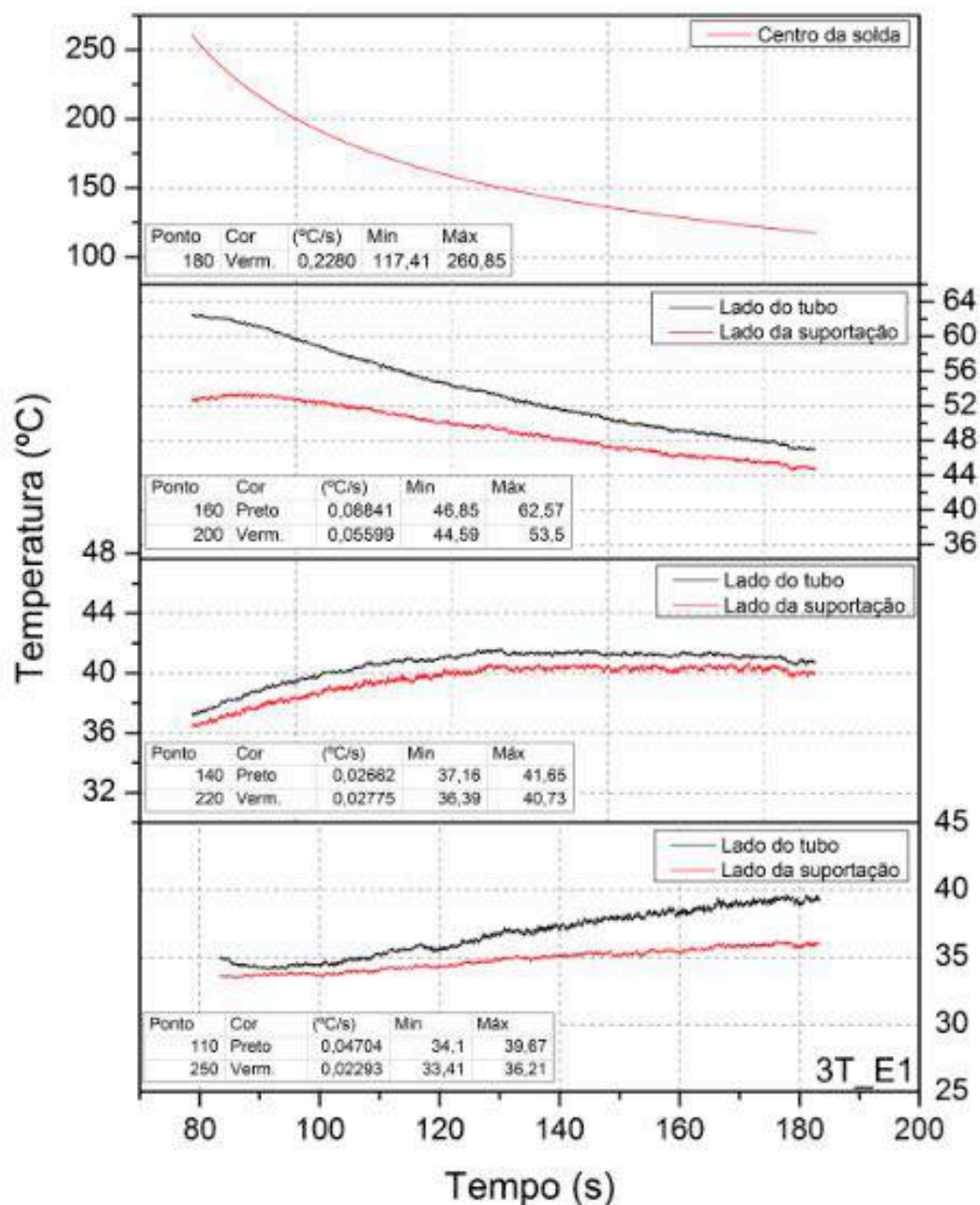


Figura 81. Exemplos de gráficos (temperatura x tempo) em pontos simétricos para o passe de enchimento (processo derivativo - STT) – Ensaio 3T-E1



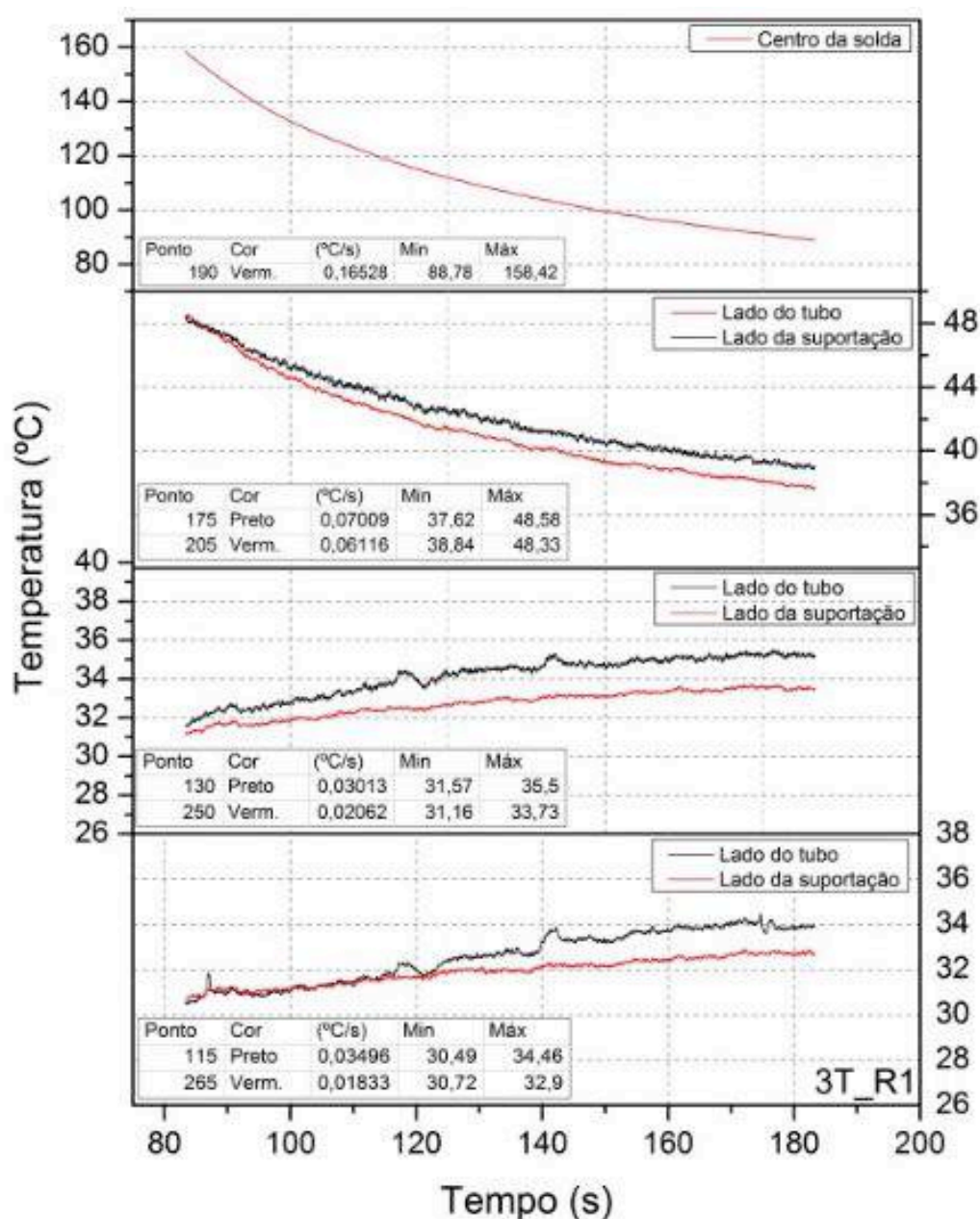


Figura 82. Exemplos de gráficos (temperatura x tempo) em pontos simétricos para o passe de raiz (processo derivativo - STT) – Ensaio 3T-R1

Esses resultados mostram que em todos os pontos simétricos examinados, tanto para o passe de raiz quanto para o passe de enchimento, que os pontos localizados do lado da suportaço, apresentam maior resfriamento em relação aos pontos localizados do lado do tubo. Isto mostra que a difusividade do lado da suportaço ou fluxo de calor é maior que a do lado do tubo, ou seja, em consequência da grande quantidade de massa que contribui para a propagação por condução do calor.



Esta diferença pode ser contida utilizando tecimento com parada lateral durante as soldagens, mas, o equipamento utilizado Tartílope V4 executa paradas bruscas. Estas paradas podem desestabilizar a poça de fusão, portanto, definiu-se nesta pesquisa não realizar soldagens com paradas laterais.

Constata-se em todos os ensaios e demonstrado pela Figura 81 e Figura 82 que a análise ocorre durante o esfriamento do cordão de solda. No geral, pontos próximos ao cordão de solda estão em processo de esfriamento e pontos mais distantes estão em processo de aquecimento, manifestando assim a propagação do calor.

Observa-se também que a diferença de temperatura entre ambos os lados para pontos simétricos é de 4°C na pior das situações. Considera-se que esta diferença de temperatura não é significativa para processos de soldagens. Outro fato que demonstra a robustez do sistema é a coloração uniforme e simétrica dos óxidos formados pelo aquecimento em ambos os lados do cordão de solda, como pode ser observada na Figura 76.

Dessa forma, é possível afirmar que a utilização de montagens com três ou dois tubos de teste não interferiu significativamente nos resultados. Assim, a diferença de massa existente em ambos os lados da instalação, não contribuem para a falta de fusão lateral frequente, podendo, ser contornado com um conjunto robusto de parâmetros.

# **CAPÍTULO V**

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo são apresentados a sequência experimental e ensaios finais realizados em tubos de meia cana utilizando-se o processo GMAW com transferência metálica por curto-circuito convencional e controlado (STT), para a união de juntas com bisel em 15° em tubos API 5L X65 de 8" de diâmetro e gás de proteção (Ar+25%CO<sub>2</sub>) para os passes de raiz e enchimento.

Os melhores cordões de solda obtidos por meio de inspeção visual foram selecionados para análise metalográfica e, após aprovados 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).

Ressalta-se que o objetivo não é uma pura qualificação, mas sim a avaliação/estudo dos processos. Uma vez em que os parâmetros estejam avaliados, pode-se partir para uma qualificação de cada processo com pessoal técnico específico (inspetor).

Dessa forma, este capítulo aparenta as definições das condições paramétricas e a sequência experimental para a escolha dos melhores cordões de solda que serão analisados por meio de macrografia.

### **5.1 Definição das condições paramétricas**

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 processo derivativo (STT), tanto a raiz, quanto o enchimento também foram feitos somente com este processo. Destaca-se que é possível soldar uma junta alterando-se os processos entre raiz e enchimento, por exemplo, executando-se a raiz com convencional e o enchimento com o processo derivativo (STT).

Dessa forma, foram desenvolvidas duas condições paramétricas para cada processo: uma para a raiz e outra para o enchimento, ambas com transferência por curto-circuito e com o mesmo processo.

O principal resultado conseguido por estes autores e utilizados para tomada decisão durante os ensaios foi a corrente eficaz (rms). A corrente eficaz está relacionada com o calor dissipado e representa o valor de uma corrente contínua que produz a mesma dissipação de potência que a corrente periódica (NAKASHIMA, 2013). Ou seja, soldas que possuem um conjunto de parâmetros que produzem correntes eficazes abaixo das encontradas por estes autores podem ocasionar a falta de fusão devido a diminuição da energia imposta.

Os cordões de solda que forem aprovados pela inspeção visual e apresentarem maiores correntes foram examinados por macrografia.

Foram utilizadas condições fixas para os parâmetros de cada processo, sendo eles, a mistura Ar+25%CO<sub>2</sub> com vazão de 15 l/min, sem o uso de Hi/Low, sem cobre junta, eletrodo ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro e tecimento triangular. O tecimento triangular foi utilizado sem parada lateral, pois, conforme verificado nas soldagens preliminares com filmagem termográfica o equipamento (Tartilope V4) realiza paradas laterais bruscas podendo desestabilizar a poça de fusão. Já a utilização do tecimento trapezoidal não foi possível, porque, o equipamento em utilização não atinge velocidades de soldagens altas (acima de 40 cm/min).

Magalhães (2012) realizou a soldagem de dutos por retificação e propôs a utilização de transferência metálica por voo livre durante o enchimento da junta. Entretanto, o mesmo escorrimento foi notado para ambos os gases pesquisados por ele (CO<sub>2</sub> puro e C25) na posição vertical descendente. Desta forma, somente a transferência por curto-circuito foi utilizada, tanto na modalidade convencional quanto controlada (STT).

Todas as soldas foram realizadas com tecimento, na descendente<sup>1</sup>, e além disto, foram variados o ângulo de ataque da tocha (reto e puxado) para os parâmetros em que se conseguiu bons resultados. A regulagem da velocidade de soldagem foi calculada pela Eq. 19 para manter constante a relação  $V_a/V_s$ . Este valor serviu de referência, mas foi modificada em detrimento do comportamento da poça de fusão, geometria da raiz para o passe de enchimento e das respostas para os valores de corrente durante os ensaios.

Os parâmetros estudados aqui devem ser robustos o suficiente para atender as necessidades das três posições de soldagem. Ou seja, produzir cordões de solda sem a

---

<sup>1</sup> Todas as soldagens foram executadas na descendente em função da maior velocidade de soldagem obtida em relação à ascendente (Costa, 2011). Além disso, foi verificado experimentalmente que o Tartilope V4 não consegue executar soldagem na ascendente.

existência de defeitos, tanto na inspeção visual quanto nos ensaios mecânicos, conforme definidos pela API 1104 (2010).

Não foi elaborado um planejamento experimental devido à grande interação entre os parâmetros. Assim, os ensaios foram realizados com base na experiência da influência de cada parâmetro do processo no resultado final do cordão.

## 5.2 Processo GMAW curto-circuito convencional

### 5.2.1 Determinação dos parâmetros para o passe de raiz

Como destacado no Capítulo 2, no processo GMAW curto-circuito convencional, a tensão de soldagem, a velocidade de alimentação do arame, a indutância e velocidade de soldagem são variáveis importantes e que influenciam na transferência por curto-circuito convencional. A Tabela 25 apresenta os parâmetros utilizados nos ensaios. Todas as soldas foram realizadas com o controle automático de ajuste da DBCP acionado. Ressalta-se que nos ensaios preliminares (Item 4.3.1) não foi possível executar o passe de raiz. Na Tabela 25, são apresentados os ensaios realizados, assim como os valores de regulagem e os valores medidos de corrente média, tensão média, corrente RMS e tensão RMS para o passe de raiz. Estes valores foram calculados por programa desenvolvido no Laprosolda, denominado de “Curto3” (Anexo 1).

Tabela 25. Parâmetros utilizados e medidos para determinação do parâmetro de raiz no curto-circuito convencional

Teste*	Identificação do corpo de prova	Vs** (cm/min)	Freq. Tecimento Hz	DBCP (mm)	Corrente Média (A)	Corrente RMS (A)	Tensão Média (V)	Tensão RMS (V)
1	CNV2	30,6	3,2	12	170	186	18,1	19,3
2	CNV1	32,9	3,4	12	169	185	18,2	19,4
3	CNV5	35,2	3,7	12	166	182	18,3	19,8
4	CNV7	37,6	3,9	12	161	178	17,3	18,9
5	CNV14	39,2	4,1	12	197	211	18,1	19,1
6	CNV11	39,2	4,1	14	193	207	18,2	19,2
7	CNV17	39,2	4,1	18	205	217	18,2	19,3

\*Os parâmetros  $V_a = 5$  m/min, amplitude do tecimento = 3 mm, Tensão = 19,0 V e Indutância = 40% foram mantidos constantes.

\*\*A velocidade de soldagem parametrizada no console do Tartilope é dada por  $V_s \cdot 1,277$ .

Como destacado nos testes preliminares executados anteriormente com parâmetros pré-qualificados, o descarte da raiz, se deu por motivos do preenchimento de quase que a totalidade da junta soldada (Figura 68). Portanto, a estratégia inicial é de aumentar a velocidade de soldagem e produzir uma resposta de corrente eficaz maior ou igual a 198 A com aproximadamente 18,4 Vrms, uma vez que, estes resultados colaboraram para o não aparecimento de falta de fusão lateral em análises macrográficas realizadas por Scotti et al. (2013).

Como apontado no Item 4.2, para encontrar o valor real de velocidade do carrinho basta dividir o valor parametrizado no console do Tartilope V4 por 1,277. No trabalho de Scotti et al. (2013) não é mencionado se existe alguma calibração de velocidade, ou seja, se a velocidade de soldagem utilizada de 31 cm/min é um valor registrado no console do equipamento orbital ou é o valor real de movimentação do carrinho. Então optou-se por utilizar inicialmente o valor de velocidade de soldagem de 39 cm/min programado no console do Tartilope, que corresponde a aproximadamente 31 cm/min (39 cm/min dividido pelo fator de correção 1,277).

O valor da indutância foi mantido constante e igual a 40% durante toda a realização dos testes com o processo GMAW convencional, pois, a máquina já se encontrava regulada para esta indutância. Magalhães (2012) realizou testes em que se variou a indutância desde 0 a até 100 e não se observou grande significância na variação dos valores de tensão e corrente média. Já no trabalho de Costa (2011), o mesmo optou por trabalhar com a indutância no modo “off” devido a não interferência em resultados de corrente e tensão em soldas de chanfro estreito.

Como mencionado no Capítulo 2 (Item 2.2) o envelope operacional para GMAW curto-circuito convencional utilizando gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub>, sem Hi-Low, está entre 17,5 V e 20,5 V para velocidades de alimentações próximas a 5 m/min. Portanto, decidiu-se em manter 19,0 V em todos os testes.

Magalhães (2012) verificou em estudos que a amplitude de tecimento interfere na penetração. Assim, como nos resultados de Scotti et al (2013) obteve-se penetração para abertura de raiz 3 mm utilizando-se amplitude de tecimento 3 mm, optou-se por manter em todos os testes amplitude de tecimento de 3 mm ( $\pm 1,5$  mm).

No Teste 1, como parâmetro de partida, utilizou-se a velocidade de soldagem de 30,6 cm/min e velocidade de alimentação de 5 m/min. Neste teste conseguiu-se completar a solda, mas o mesmo apresentou visivelmente um defeito decorrente da falta de penetração em parte da posição plana, em toda a posição vertical e sobrecabeça (Figura 83).

Foi observado durante a execução deste Teste 1, que a poça de fusão se mantém um pouco à frente do arame na transição entre a posição plana e vertical se estendendo até

o início da posição sobrecabeça fazendo com que o metal anteriormente fundido escale a poça de fusão que está escorrendo a frente. Pereira et al. (2013) verificaram a ocorrência de falta de penetração em virtude do efeito de sobreposição da poça de fusão. Portanto, conclui-se que a velocidade de soldagem está reduzida e a falta de penetração na raiz é devido ao escorrimento da poça de fusão nestas posições.

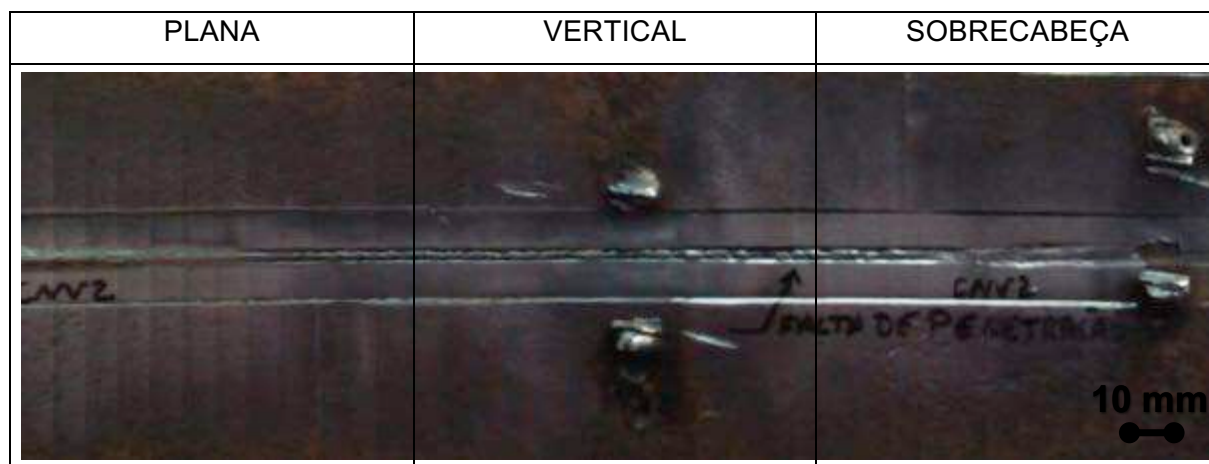


Figura 83. Aspecto da raiz do cordão de solda (lado interno ao duto) para o Teste 1

No Teste 2, aumentou-se a velocidade de soldagem para 32,9 cm/min com o intuito de manter a poça de fusão atrás do arame, mas apesar de apresentar penetração na posição plana com reforço em seu maior valor de 1,12 mm e menor valor de 0,03, este também apresentou falta de penetração em parte das posições vertical, descendente e sobrecabeça (Figura 84). Observa-se que aumentando a velocidade de soldagem a poça de fusão começa escorrer a partir da posição vertical, resultando em um melhor resultado do que no Teste 1.

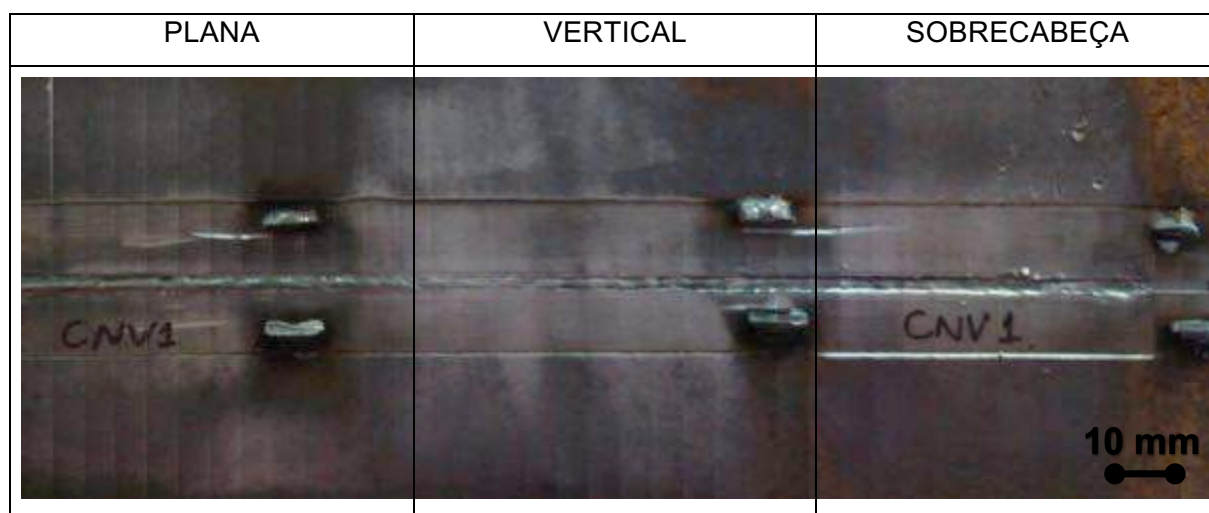


Figura 84. Aspecto da raiz do cordão de solda (lado interno ao duto) para o Teste 2

No Teste 3, aumentou-se a velocidade de soldagem para 35,2 cm/min e foi capaz de permitir penetração nas três regiões críticas da posição 5G de soldagem (plana, vertical descendente e parte da sobrecabeça). Observa-se no final do cordão de solda na sobrecabeça a existência de falta de penetração, mas apresentou penetração nas posições planas e vertical (Figura 85).

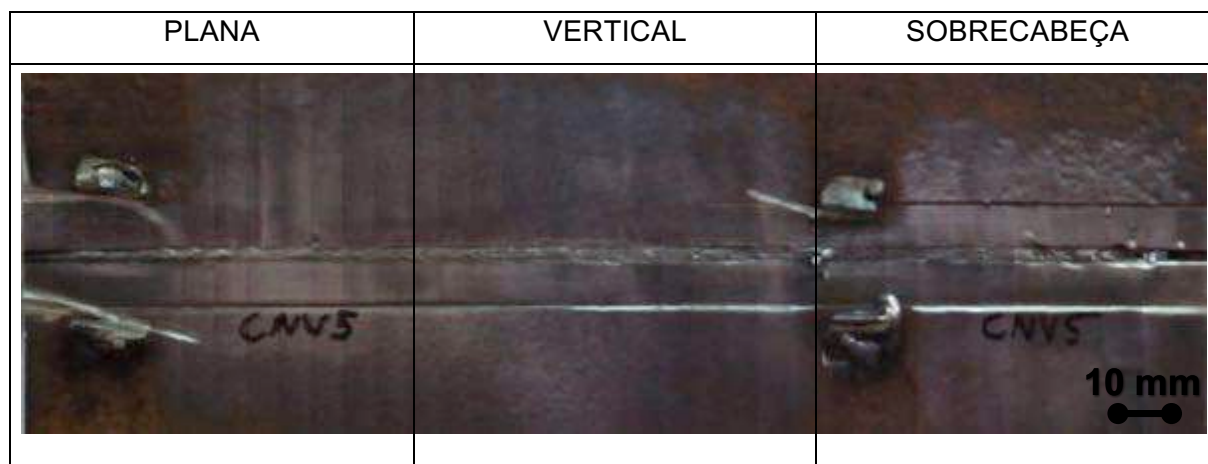


Figura 85. Aspecto da raiz do cordão de solda (lado interno ao duto) para o Teste 3

No Teste 4, manteve a estratégia de aumentar a velocidade de soldagem, agora em 37,6 cm/min. Durante a execução de todo o cordão de solda observou-se que a poça de fusão permaneceu atrás do arame, mas observa-se a perfuração da raiz no fim da posição sobrecabeça (Figura 86), provavelmente devido à alta energia imposta.

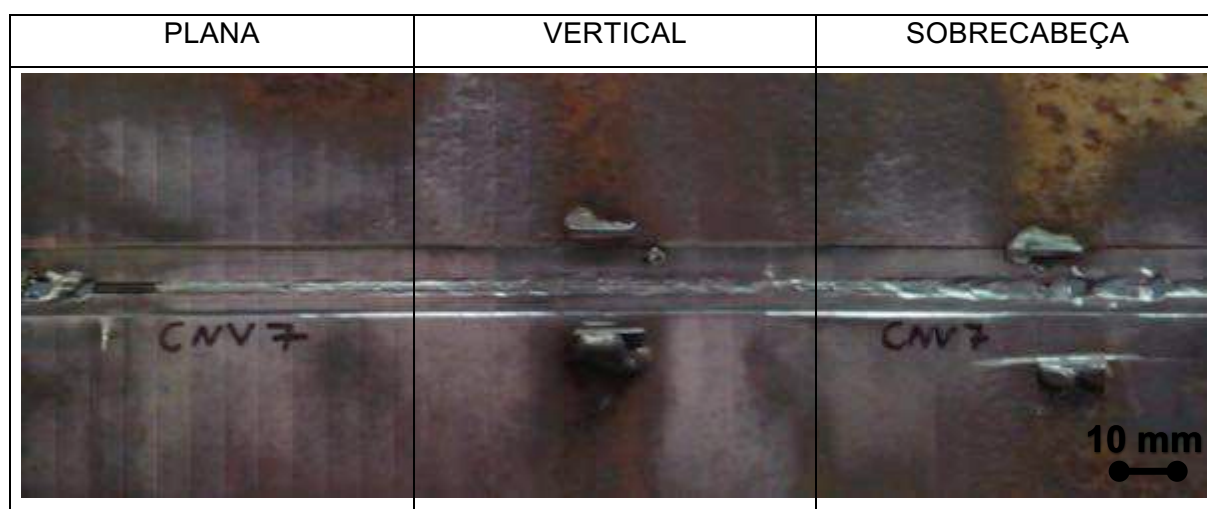


Figura 86. Aspecto da raiz do cordão de solda (lado interno ao duto) para o Teste 4

No Teste 5, a estratégia foi diminuir a energia imposta para evitar a perfuração. Conforme visto no Item 2.2.1.1, aumentando-se a velocidade de soldagem, mantendo a



DBCP em 12 mm, consegue-se diminuir a energia de soldagem. Logo, aumentou-se a velocidade de soldagem para 39,2 cm/min (velocidade de movimentação limite atingida pelo equipamento Tartilope V4). Mesmo aumentando a velocidade de soldagem nota-se a perfuração no início do cordão de solda, mas não observou a perfuração no fim do cordão (Figura 87), fato parecido com o que aconteceu nos ensaios preliminares para o passe de raiz executados com o processo STT. Neste Teste 5, a tensão RMS média foi de 19,1 V e a corrente RMS média de 211 A. A princípio os valores de corrente e tensão são satisfatórios e acima dos valores conseguidos por Scotti et al. (2013).

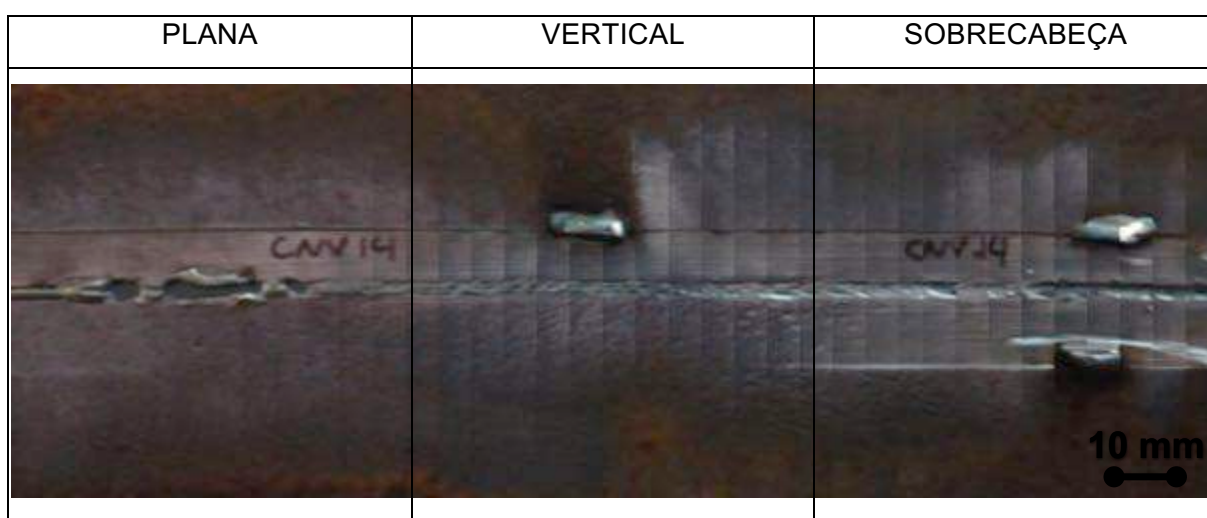


Figura 87. Aspecto da raiz do cordão de solda (lado interno ao duto) para o Teste 5

No Teste 6, para sanar a perfuração no início da posição plana procurou-se aumentar a DBCP para 14 mm, com o intuito de diminuir a energia imposta em fonte tensão constante, como visto no Item 2.2.1.1. Conseguiu-se um cordão de solda com boa penetração na posição plana e vertical (Figura 88). Pode-se observar pela Figura 88, que a perfuração em relação ao Teste 5 foi em menor extensão e seguindo nessa linha pode-se aumentar ainda mais a DBCP para tentar sanar o problema, uma vez que a corrente eficaz média foi de 207 A.

No Teste 7, aumentou-se a DBCP para 18 mm e durante a execução da soldagem para a posição sobrecabeça foi necessário desviar o arco para a lateral de um dos lados do chanfro para não apagar o arco, de forma que o arame não enterrasse e conseguisse completar a raiz. O resultado da corrente eficaz do passe de raiz para o Teste 7 foi de 217 A, ou seja, bem maior que nos Testes 5 e 6 devido a maior estabilidade do arco e a não perfuração da raiz. Este resultado também é maior do que a conseguida nos estudos de Scotti et al. (2013), no qual a corrente RMS encontrada por este autor de 198 A, e portanto,



satisfatória. Já a tensão RMS média foi de 19,3 V e está de acordo com o envelope de trabalho visto no Capítulo 2.

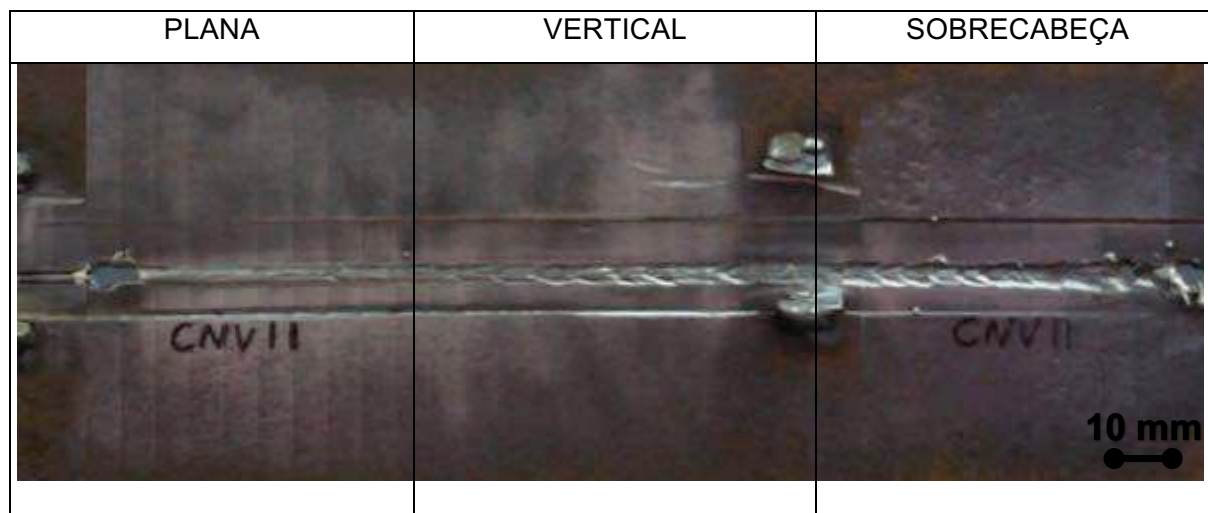


Figura 88. Aspecto da raiz do cordão de solda (lado interno ao duto) para o Teste 6

Para o Teste 7, o cordão de solda (Figura 89) não apresenta por meio de inspeção visual mordeduras, trincas e nem falta de penetração. Assim, a solda realizada no Teste 7 é adequada pela Norma API 1104 (2010). Destaca-se que na posição sobrecabeça, há uma concavidade na raiz. Entretanto, conforme a API 1104 (2010), qualquer comprimento de concavidade é aceito, desde que não haja falta de penetração.

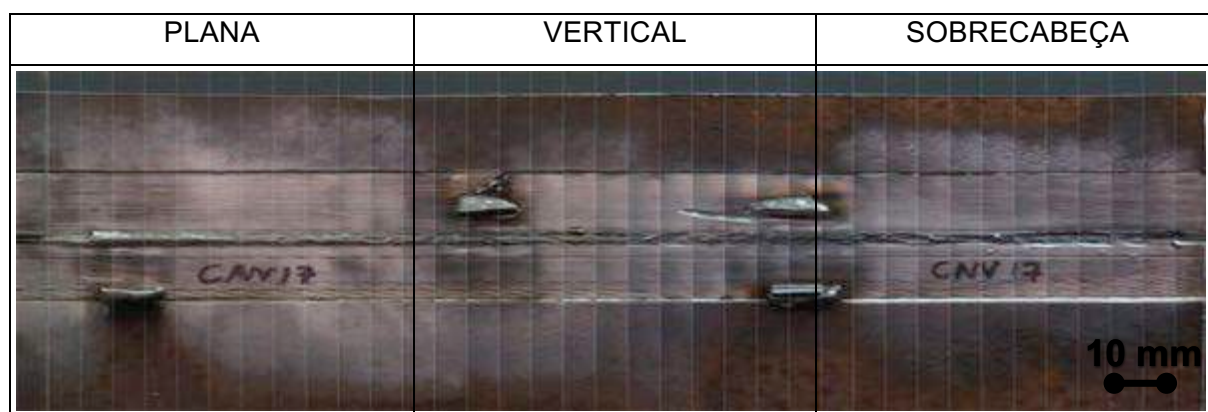


Figura 89. Aspecto da raiz do cordão de solda (lado interno ao duto) para o Teste 7

A análise de porosidade e falta de fusão lateral foram realizadas em conjunto com o passe de enchimento por meio de macrografias, a serem apresentadas no Item 5.2.3.2.

Para a velocidade de soldagem 39,2 cm/min a frequência de tecimento calculada por meio da Eq. 8 foi de 4,1 Hz. Neste caso, o equipamento permite que essa frequência seja parametrizada para amplitudes de soldagem de 3 mm ( $\pm 1,5$  mm). Mas, a limitação de

parametrização da frequência de oscilação no Tartilope, conforme mencionado no Capítulo 3, não se traduz em perda de qualidade da união soldada, haja vista que Magalhães et al. (2014) avaliaram diferentes valores de frequência de tecimento e observaram que as raízes das soldas não apresentaram diferenças significativas quanto à variação da frequência de tecimento.

Conforme visto no Item 4.2 para preencher a junta em 50% é necessário que a relação  $V_a/V_s$  seja de 16,42. Com esse parâmetro e técnica utilizada na sobrecabeça é possível obter o passe de raiz para o processo convencional preenchendo a junta teoricamente em aproximadamente 40%, uma vez que a relação  $V_a/V_s$  é de 12,75. Foram realizados mais testes com os mesmos parâmetros do Teste 7 para verificar sua robustez e em todos obtiveram resultados semelhantes em corrente, tensão e aspectos superficiais.

Por fim, a Tabela 26 apresenta um resumo das principais características encontradas para cada um dos testes anteriormente apresentados na Tabela 25.

Tabela 26. Resumo das características encontradas para o processo GMAW convencional

Teste	Principais características encontradas
1	Conseguiu-se completar a solda, mas apresentou visivelmente falta de penetração em parte da posição plana, em toda a posição vertical e sobrecabeça devido a escorrimto.
2	Apresentou falta de penetração em parte das posições vertical, descendente e sobrecabeça caracterizado por escorrimto.
3	Falta de penetração no final do cordão da sobrecabeça, mas apresentou penetração nas posições planas e vertical.
4	Perfuração da raiz no fim do cordão de solda na posição sobrecabeça.
5	Perfuração no início do cordão de solda, mas não observou a perfuração no fim do cordão.
6	Conseguiu-se um cordão de solda com boa penetração na posição plana e vertical. Pode-se observar que a perfuração em relação ao teste 5 na posição plana foi menor.
7	O cordão de solda não apresenta por meio de inspeção visual mordeduras, trincas e nem falta de penetração. A corrente eficaz foi de 217 A e a tensão RMS foi de 19,3 V.

O conjunto de parâmetros encontrado e referente ao Teste 7 está de acordo com o envelope operacional proposto por Magalhães (2012) e Scotti et al. (2013) mostrado no Capítulo 2. Com base nesse conjunto de parâmetros definido, a Figura 90 mostra o aspecto da raiz (parte interna do tubo) executada com o processo convencional. Nesta figura é possível verificar que o processo convencional por curto-circuito gera mais respingos que o processo derivativo (STT) apresentado à frente na Figura 105.

Por fim, como visto no caso do Teste 7, para não ocorrer a perfuração da raiz no processo convencional na posição sobrecabeça, devido à alta velocidade de soldagem, é necessário desviar o arco na direção de um dos chanfros. Este procedimento pode favorecer o aparecimento de mordeduras na posição sobrecabeça e consequentemente pode favorecer a falta de fusão no passe de enchimento.



Figura 90. Detalhes do passe de raiz interno executado com o processo convencional por curto-circuito (Teste 7)

### 5.2.2 Determinação dos parâmetros para o passe de enchimento

Os parâmetros utilizados na execução dos passes de raiz que suportam os passes de enchimento nestes ensaios são mostrados na Tabela 27. Os parâmetros de raiz foram determinados por meio de ensaios preliminares e desenvolvimento apresentado no item anterior (Item 5.2.1).

Tabela 27. Parâmetros finais do passe de raiz para o processo convencional

Va (m/min)	Vs (cm/min)	Amplitude de tecimento (mm)	Frequência de tecimento. (Hz)	Tensão (V)	Indutância (%)	DBCP (mm)
5	39,2*	3	4,1	19	40	18

\*A velocidade de soldagem parametrizada no console do Tartilope é dada por  $Vs \cdot 1,277$ .

Para o passe de enchimento/acabamento subsequente, a Tabela 28 traz os parâmetros de soldagem utilizados. Conforme mostrado na Figura 67, a distância entre os chanfros na face exterior do duto é de 6,75 mm. Portanto, a amplitude de tecimento em todos os testes foi fixada em 4,0 mm ( $\pm 2,0$  mm) de maneira que o tecimento consiga varrer a área do chanfro livre. Além disso, não foi possível adquirir os valores de corrente e tensão para o Teste 1, pois, não conseguiu-se executar o cordão de solda de enchimento devido aos vários escorrimientos.

Tabela 28. Parâmetros utilizados nos passes de enchimento do processo convencional

Teste*	Identificação da amostra	Va (m/min)	Vs** (cm/min)	Frequência de tecimento (Hz)	Tensão (V)	Inclinação da tocha (°)	Corrente Média (A)	Corrente RMS (A)	Tensão Média (V)	Tensão RMS (V)
1	CNV1	5,0	30,6	3,2	18,0	0	-	-	-	-
2	CNV4	4,0	25,0	2,6	18,0	0	172	187	17,3	18,6
3	CNV6	4,0	22,7	2,4	18,0	0	173	188	17,4	18,5
4	CNV7	4,0	20,4	2,1	18,0	0	174	189	17,1	18,3
5	CNV11	3,8	23,9	2,5	18,0	0	163	179	17,2	18,7
6	CNV13	3,8	21,9	2,3	18,0	0	165	184	17,1	18,6
7	CNV15	3,8	20,4	2,1	18,0	0	162	182	17,2	18,5
8	CNV12/ CNV17	3,8	18,8	2,0	18,0	0	166	181	17,3	18,8
9	CNV19	3,8	18,0	1,9	18,0	0	165	180	17,1	18,5
10	CNV20	3,5	21,0	2,2	18,0	0	162	179	16,3	17,9
11	CNV23	3,5	16,5	1,7	17,0	0	153	170	16,2	17,8
12	CNV24	3,5	16,5	1,7	17,0	0	151	168	16,5	17,7
13	CNV27	3,5	16,5	1,7	17,0	15	152	172	16,3	17,5
14	CNV25	3,5	16,5	1,7	17,0	15	152	172	16,1	17,3

\*Os parâmetros amplitude do tecimento = 4 mm, Indutância = 40% e DBCP = 12 mm foram mantidos constantes.

\*\*A velocidade de soldagem parametrizada no console do Tartilope é dada por  $Vs \cdot 1,277$ .

Para os testes em que ocorreram escorrimientos, os valores de corrente e tensão foram calculados excluindo os picos de corrente e vales de tensão e calculando um valor médio com o auxílio do “Curto3” (Anexo 1). Todos os passes de raiz executados para suportar os passes de enchimento foram validados para valores de corrente e tensão eficaz muito próximos aos respectivos valores atingidos nos ensaios de determinação de parâmetros, sendo eles 217 A e 19,3 V. Destaca-se que a limitação para imposição de

maiores valores de velocidade de alimentação/corrente foi o escorrimento da poça na posição 15 horas (vertical descendente) e 18 horas (vertical sobrecabeça).

Com base em trabalhos anteriores, haja visto que Scotti et al. (2013) ao utilizarem a soldagem com o GMAW processo convencional em dutos API 5L X65 de 8" com espessura de parede 8 mm, em chanfro com bisel de 15° e nariz de 1 mm, não obtiveram sucesso para o passe de enchimento. Em resultados analisados, a causa da falta da fusão foi o baixo valor de corrente eficaz de 177 A que obteve como resposta.

Portanto, a estratégia adotada é aumentar a velocidade de alimentação e produzir uma resposta em corrente RMS média maior que 177 A, mas com o limitante para não escorrer a poça de fusão nas posições vertical de sobrecabeça.

Por apresentar resultados confiáveis no passe de raiz, o parâmetro de indutância foi de 40% para todos os ensaios.

Como resultados, são apresentadas fotos correspondentes aos ensaios realizados apenas nos casos mais representativos que ilustram as dificuldades obtidas e os bons resultados obtidos.

Para o Teste 1 desta etapa de enchimento, tentou-se extrapolar o valor de velocidade de alimentação conseguida por Scotti et al. (2013) em 1,5 m/min, passando para 5,0 m/min e mantendo a mesma DBCP e tensão, com o intuito de aumentar a resposta de corrente. Este teste não obteve sucesso, pois, os escorrimentos ocorreram em todas as posições.

Nos Testes 2, 3 e 4 diminuiu-se a velocidade de alimentação para 4,0 m/min e a velocidade de soldagem, respectivamente, para 25,0 cm/min, 22,7 cm/min e 20,4 cm/min. Como resultado observou-se a má formação do cordão e escorrimentos acentuados em toda a extensão do cordão (Figura 91 e Figura 92).

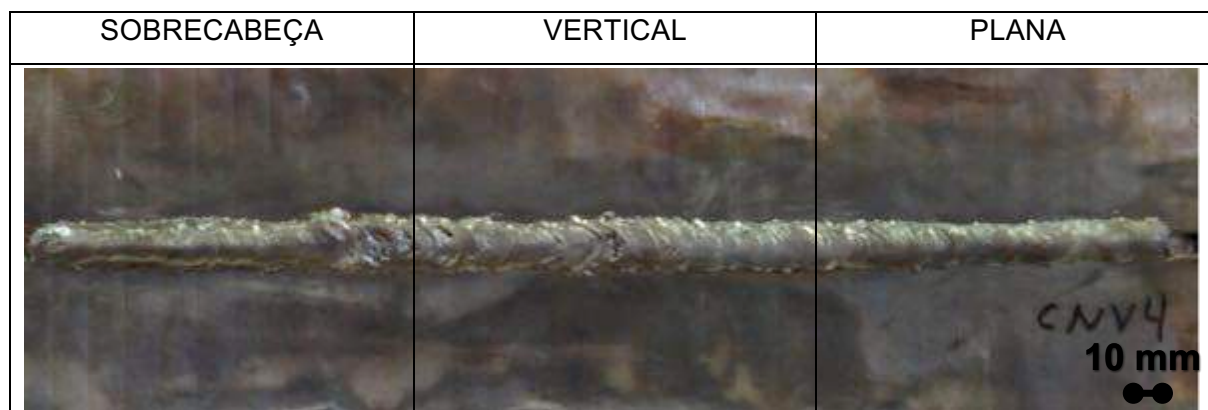


Figura 91. Cordão de solda do Teste 2: passe de enchimento com  $V_s = 25,0$  cm/min e  $V_a = 4,0$  m/min com ângulo de inclinação da tocha em 0°



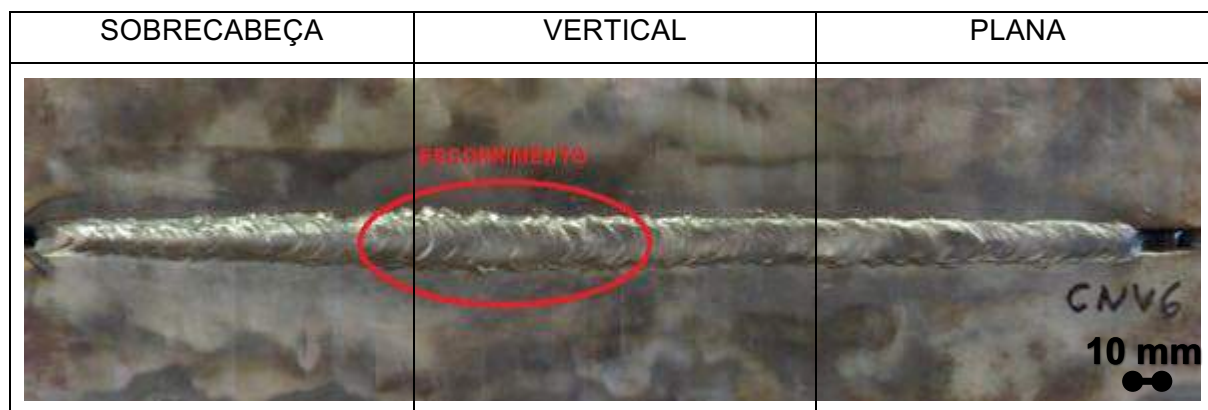


Figura 92. Cordão de solda do Teste 3: passe de enchimento com  $V_s = 22,7$  cm/min e  $V_a = 4,0$  m/min com ângulo de inclinação da tocha em  $0^\circ$

Conforme visto no Item 2.2.1.1, reduzindo-se a velocidade de soldagem, aumenta-se o calor imposto na chapa para a mesma DBCP e tensão, agravando os escorrimentos. Logo, optou-se por diminuir a velocidade de alimentação, uma vez que, aumentar a DBCP ou tensão deixam o arco mais longo e pode favorecer o destacamento da gota sem acompanhar o arco fora de posição.

Nos Testes 5, 6, 7, 8 e 9, diminuiu-se a velocidade de alimentação para 3,8 m/min e a velocidade de soldagem, respectivamente para 23,9 cm/min, 21,9 cm/min, 20,4 cm/min, 18,8 cm/min e 18,0 cm/min. O Teste 5 apresentou escorrimentos nas posições vertical e sobrecabeça (Figura 93) devido à alta velocidade de soldagem em relação a velocidade de alimentação adotada.



Figura 93. Cordão de solda do Teste 5: passe de enchimento com  $V_s = 23,9$  cm/min e  $V_a = 3,8$  m/min com ângulo de inclinação da tocha em  $0^\circ$

No Teste 6, conseguiu-se completar o cordão sem escorrimento (Figura 94), mas houve o aparecimento do desvio do cordão (*humping*) como pode ser observado também no cordão do Teste 3. O que há de comum entre o Teste 3 e o Teste 6 é a aproximação na relação entre  $V_a/V_s$  de 17,62 para o Teste 3 e de 17,35 para o Teste 6.

O “humping” (defeito costas de dragão) pode ser definido como uma superfície de contorno irregular, que consiste de uma série de protuberâncias semelhantes a grânulos. A ocorrência do “humping” está associada com uma grande depressão da poça de fusão observados em velocidades elevadas (MENDEZ ET AL, 1999).

O limite do aumento da velocidade de soldagem e de corrente gera o aparecimento de defeitos, tais como o “humping”. Portanto, para a correção deste defeito é necessário aumentar a quantidade de material depositado na junta ou diminuir a velocidade de soldagem. Isso enfatiza o fato de que o calor imposto neste teste é insuficiente. Neste ensaio a resposta em corrente e tensão eficaz foi de 184 A e 18,6 V.

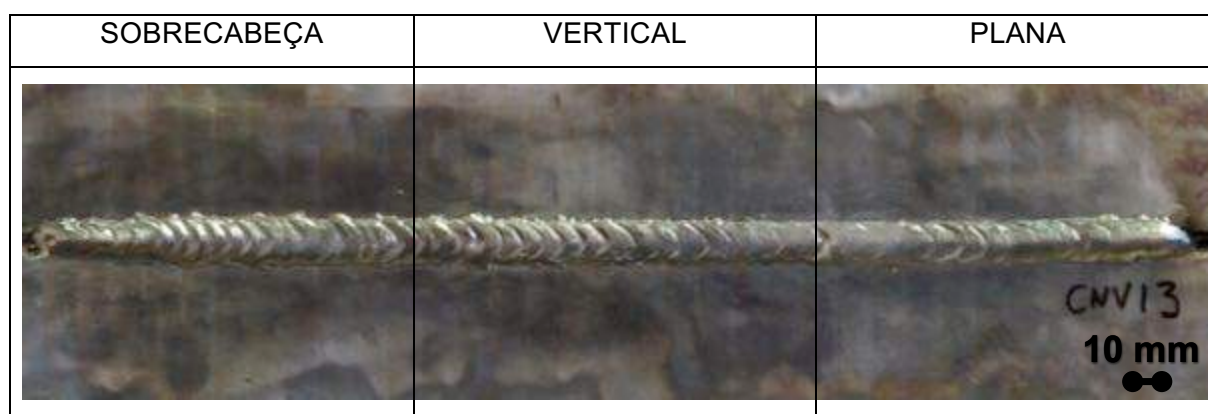


Figura 94. Cordão de solda do Teste 6: passe de enchimento com  $V_s = 21,9$  cm/min e  $V_a = 3,8$  m/min com ângulo de inclinação da tocha em  $0^\circ$

Nos Testes 7, 8 e 9, já com velocidades de soldagem menores para conter o “humping”, nota-se que a poça escorre na posição vertical (Figura 95) e vai se acomodando e acumulando imediatamente à frente da tocha, de modo que a solidificação aconteça com pouco ou sem o gás de proteção, o que contribui para a geração de porosidades.

Mesmo ocorrendo em condições de soldagem semelhantes a do processo derivativo (STT), em que não apresentou tais porosidades visíveis (item 5.3.2), não se descarta a contribuição da evaporação da cola pertencente a fita fixada no duto teste, que auxilia no sistema de ajuste automático da DBCP, na geração das porosidades.

Quando o curto-circuito ocorre sobre o metal já solidificado o mesmo se espalha perfurando o cordão de enchimento e de raiz, como pode ser visto na amostra CNV12 (Figura 95).

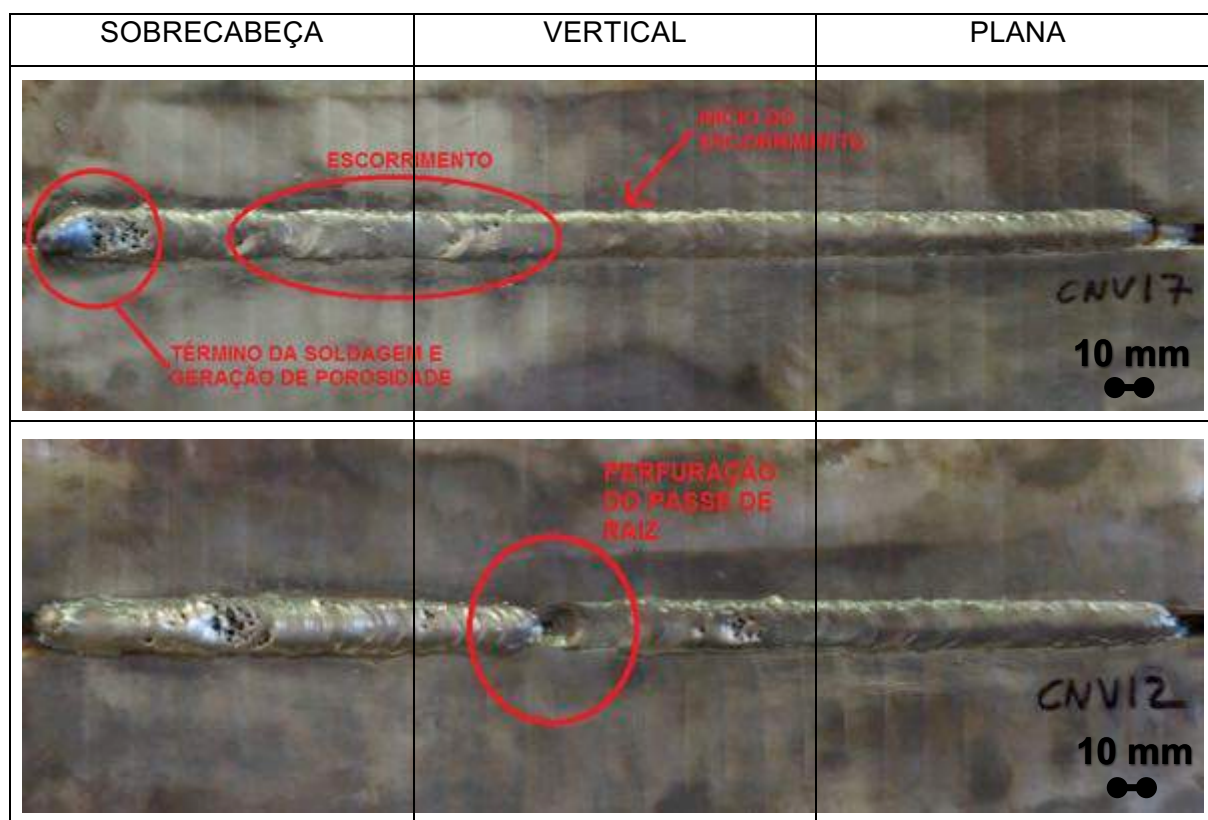


Figura 95. Cordões de solda do Teste 8: passe de enchimento com  $V_s = 18,8$  cm/min e  $V_a = 3,8$  m/min com ângulo de inclinação da tocha em  $0^\circ$

Nas soldas realizadas com velocidade de alimentação acima de 3,5 m/min, o motivo principal para o descarte dos cordões foi o escoamento do enchimento, decorrente do maior calor imposto. O escoamento tem seu início quando se aproxima da transição entre a posição plana e vertical e se agrava à medida em que a poça de fusão alcança a posição vertical.

Dos conjuntos operacionais anteriores descartados observa-se que durante a execução das soldagens, a poça de fusão fica à frente da tocha e escorre com facilidade durante toda a soldagem. Demonstrando que para este processo o calor imposto e consequentemente a molhabilidade está alta para esta configuração de junta.

O único ensaio em que não houve escoamento até aqui foi o Teste 6, com resposta em corrente e tensão eficaz de 184 A e 18,6 V, mas foi descartado pela presença do “humping”.

Neste contexto, testou-se o parâmetro sugerido por Scotti et al. (2013), representado na Tabela 28 pelo Teste 10. Porém, nas condições de parametrização sugeridas pelos autores, ocorreram escoamentos (Figura 96). Não se descarta o efeito do sistema de movimentação (tartilope), pois o tecimento pode não ter sido realizado de forma apropriada,



desestabilizando a poça, uma vez com este parâmetro o autor conseguiu produzir um cordão sem escorrimentos.

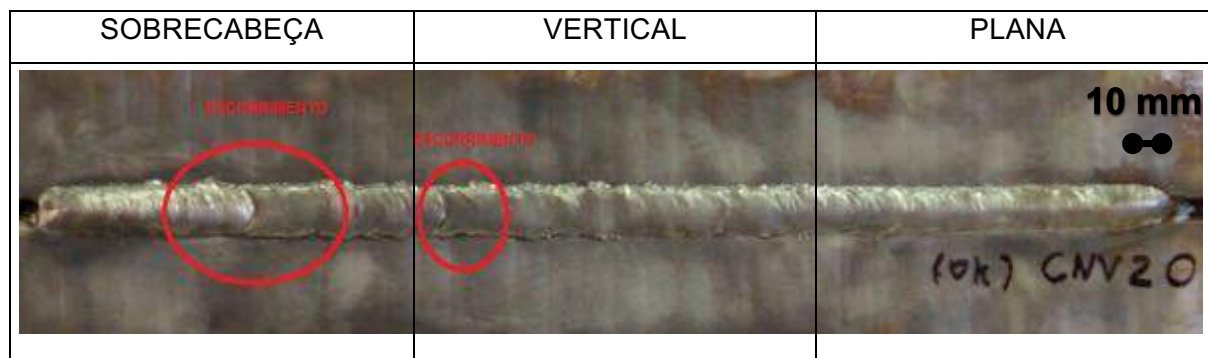


Figura 96. Cordão de solda do Teste 10: passe de enchimento com  $V_s = 21,0$  cm/min e  $V_a = 3,5$  m/min com ângulo de inclinação da tocha em  $0^\circ$

Neste sentido, foram realizados testes, diminuindo a tensão para 17,0 V e a velocidade de soldagem para 16,5 cm/min, na tentativa de conseguir completar a soldagem sem escorrimentos. Assim, nos Testes 11 e 12, conseguiu-se a formação dos cordões de solda, sem escorrimento, embora na posição vertical os cordões ficaram um pouco achatados. Os Testes 10, 11 e 12 demonstram que o processo convencional é instável e não robusto para a configuração do chanfro analisado ao ser executado com um único conjunto de parâmetros (sem a variação de parâmetros ao longo da junta), pois, nas mesmas condições de execução de Scotti et al (2013) não se conseguiu completar o cordão e utilizando outros parâmetros conseguiu-se completar o cordão sem escorrimentos.

Em seguida, inclinou-se a tocha  $15^\circ$  (puxando), uniu-se duas meias canas com os parâmetros em que se conseguiu formar o cordão de solda, no caso, os parâmetros dos Testes 11 e 12, nomeados na Tabela 28 como Testes 13 e 14. A corrente eficaz média atingida nos Testes 11 e 12 foi de 170 A e nos Testes 13 e 14 de 172 A, ou sejam, não satisfatória. Os Testes 11, 12 e 13 foram examinados macrograficamente (Item 5.2.3.2), pois não apresentaram trincas e mordeduras, estando conforme a API 1104 (2010).

Ao se comparar estes resultados com aqueles obtidos com o processo derivativo (STT) apresentado à frente no Item 5.3.2, fica claro que o processo convencional é menos produtivo por obter velocidade de soldagem 26,0% menor ( $V_s = 16,5$  e  $22,3$  cm/min, conforme Tabela 28 e Tabela 30, respectivamente para o convencional e para o derivativo). A execução do passe de enchimento se torna mais difícil pelo processo convencional por não haver o controle da corrente e pelo aporte térmico deste processo ser maior.

A Figura 97 mostra o aspecto do cordão de solda para o único conjunto de parâmetros (Teste 13) em que se conseguiu completar a soldagem sem escorrimientos. Observa-se que o cordão tem uma aparência achatada e larga.

De acordo com Costa (2011) para o controle da poça de fusão (reduzir o escorrimento da poça de fusão) deve-se utilizar maiores níveis de velocidade de soldagem. Os resultados estão de acordo para o passe de raiz, já para o passe de enchimento deve-se utilizar velocidades de soldagens menores para controle da poça nas posições verticais e sobrecabeça.

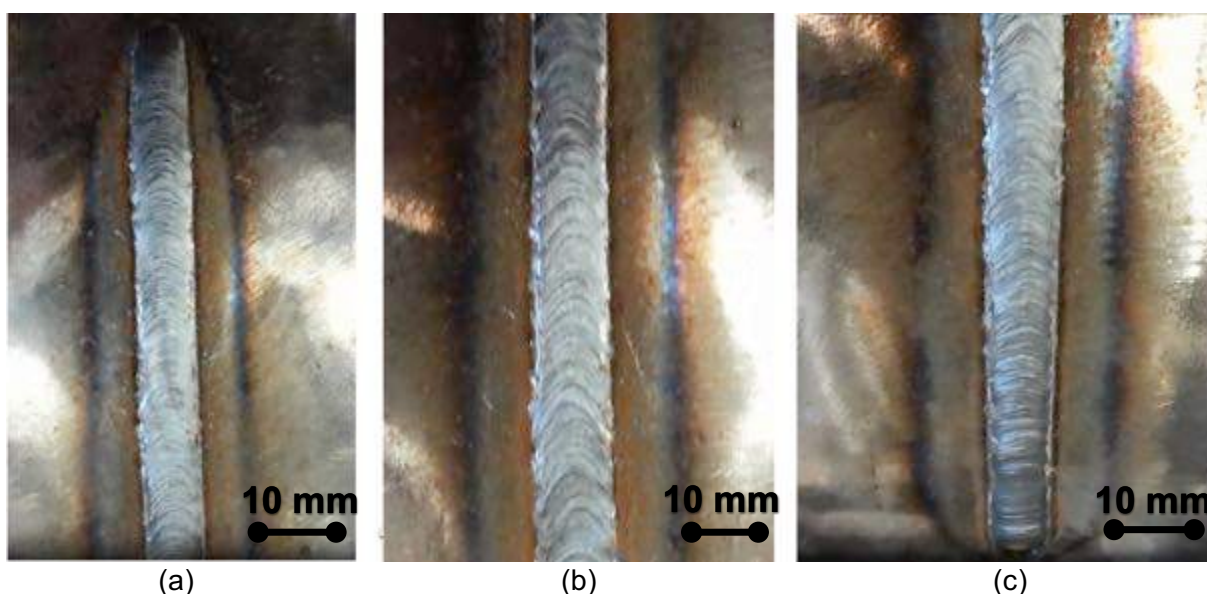


Figura 97. Aspecto superficial do cordão de solda do Teste 13 para o passe de acabamento/enchimento executado com o processo convencional para o parâmetro selecionado: (a) posição plana (b) posição vertical (c) posição sobrecabeça

### 5.2.3 Critérios de aceitabilidade

#### 5.2.3.1 Análise visual

Inicialmente avaliou-se a qualidade superficial dos cordões para detectar e analisar visualmente a possível presença de descontinuidades, tanto para o passe de raiz, como para o passe de enchimento.

Os cordões selecionados para macrografia, deveriam ser aqueles que obtivessem resposta em corrente eficaz para o passe de enchimento maiores que 177 A (valor encontrado por Scotti et al. (2013)), de aproximadamente 217A (valor encontrado em testes preliminares e maiores que encontrado por Scotti et al. (2013)) para o passe de raiz e com

qualidade superficial aceitável pela API 1104 (2010). Entretanto, apenas foi possível obter cordões sem escorrimientos, mordeduras, falta de penetração, trincas e porosidades externas com correntes entre 168 A e 172 A para o passe de enchimento, já para o passe de raiz atingiu-se o valor esperado de aproximadamente 217 A para todos os cordões.

Os valores de corrente para o passe de enchimento são menores do que os encontrados por Scotti et al. (2013), nos quais apresentaram falta de fusão lateral em análises macrográficas. Já o valor de corrente eficaz para o passe de raiz é maior do que os encontrados por Scotti et al. (2013).

Não foi possível completar a execução do cordão para a maioria dos conjuntos de parâmetros propostos na Tabela 28 em função de perfuração do passe de raiz, que pode ser notada no Teste 8 do enchimento (Figura 95), e escorrimientos observados nos Testes 1, 2, 4, 5, 7, 9 e 10, com tensão de referência de 18,0 V. Nos Testes 3 e 6 conseguiu-se completar o cordão, mas houve o aparecimento do “humping”. As soldas em que ocorreram escorrimientos e “humping” foram completadas, mas descartadas.

Destaca-se que o chanfro utilizado é atípico e tem um menor volume a ser preenchido em comparação ao ângulo mínimo de 45° normalmente requerido para a soldagem GMAW, destacando-se que este ângulo é frequentemente ao redor de 60°, o que aumenta o grau de dificuldade ao conter o escorrimiento.

Os cordões selecionados e consideravelmente aceitáveis à primeira vista foram os executados com tensão referência de 17,0 V, sendo representados na Tabela 28 pelos Testes 11, 12, 13 e 14. Os Testes 11, 12 e 13 foram examinados macrograficamente, pois, à primeira vista estão em conformidade com a API 1104 (2010).

Em geral, os passes de raiz apresentaram boa penetração para o parâmetro do selecionado no Teste 7 (Tabela 25) e que pode ser visto na Figura 89 e Figura 90. As soldas estão mais propícias a defeitos, principalmente na posição vertical e sobrecabeça para o passe de enchimento, decorrente da maior tendência ao escorrimiento do metal fundindo.

#### **5.2.3.2 Análise macrográfica dos cordões: processo convencional**

A Figura 98 apresenta as macrografias dos cordões de solda para os Testes 11, 12 e 13 do enchimento. Deve-se ressaltar que as imperfeições ou defeitos foram denominados como “A” para falta de fusão entre passes, “B” para a presença de poros, “C” para falta de fusão lateral entre metal de adição e metal base e “D” para falta de fusão entre passes e lateral. As dimensões das seções transversais foram analisadas em programa de tratamento de imagem (*ImageJ*).

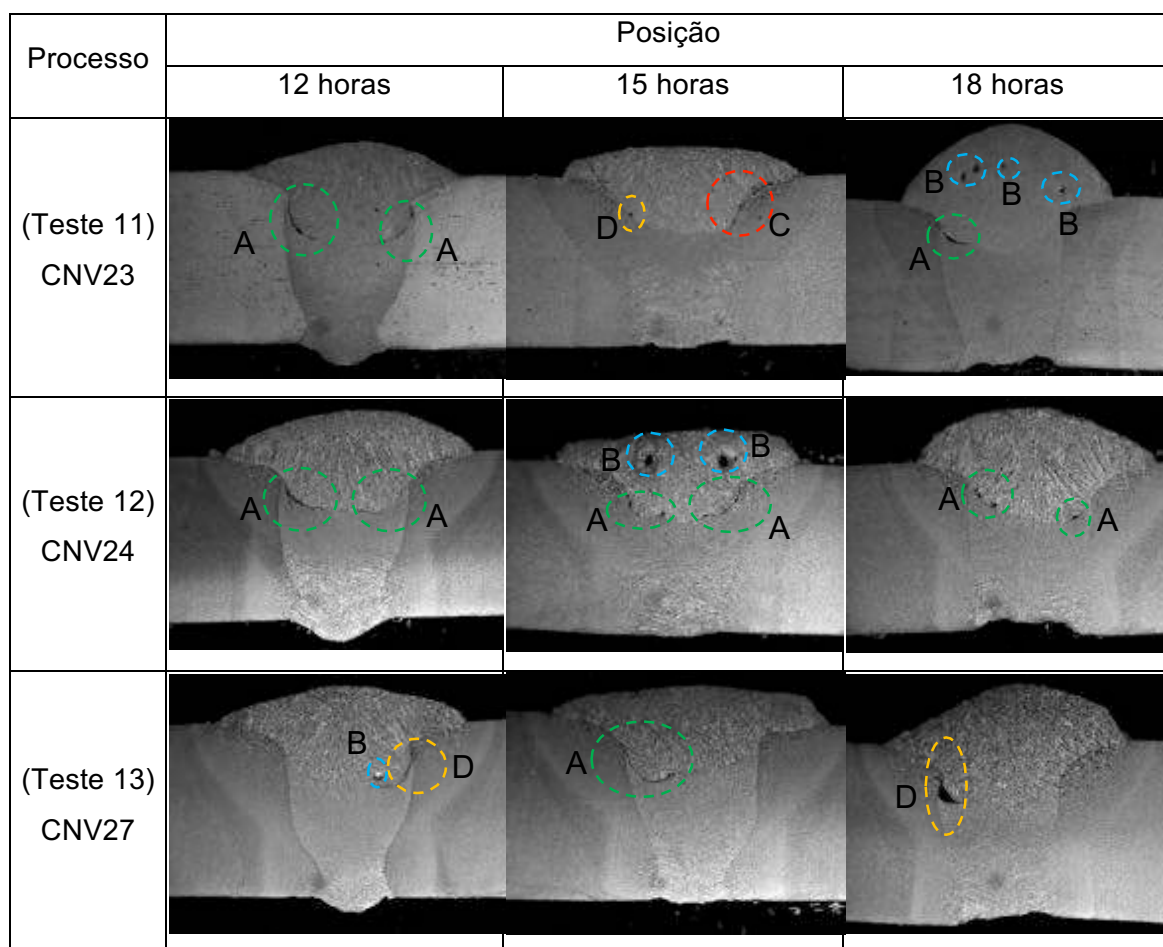


Figura 98. Macrografias dos cordões de solda para o processo convencional (espessura da chapa: 8,0 mm)

De acordo com a API 1104 (2010), falta de fusão deve ser considerada 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. Para a falta de fusão entre passes ser considerada um defeito o comprimento de uma indicação individual deve exceder em 50 mm ou o comprimento total das indicações em 300 mm do cordão de solda superar em 50 mm ou ainda o comprimento total de indicações ultrapassar 27 mm do comprimento da solda. Assim, é necessário realizar ensaio por ultrassom para verificar a extensão da falta de fusão.

Destaca-se que o objetivo do trabalho é levantar condições paramétricas apropriadas sem a existência de defeitos. Assim, poder-se-ia realizar ensaios de ultrassom, mas haveria maiores custos, desnecessários neste momento, pois o objetivo não é uma pura qualificação, mas sim a avaliação/estudo dos processos. Portanto, será considerado um defeito em todas as macrografias que apresentarem falta de fusão lateral ou entre passes, independente da sua extensão, sendo o cordão de solda descartado.

Avaliando-se as macrografias obtidas para o Teste 11, observa-se defeitos de falta de fusão entre passes na posição plana e na posição vertical. Na posição vertical também é verificado falta de fusão lateral. Para a posição sobre cabeça constata-se a presença de 4 poros.

Entretanto como descrito no Item 9.3.9.2 da API 1104 (2010) e observado na Tabela 3, a porosidade não pode exceder individualmente a 3 mm. Neste caso, percebe-se visualmente e por meio de mensuração que os poros em questão não possuem dimensão individual maior que 3 mm, não sendo portanto considerado um defeito para esta seção transversal. A maior dimensão encontrada com o auxílio do software de tratamento de imagem é de 0,60 mm. Conforme Item 9.3.9.2c da API 1104 (2010), a distribuição da porosidade dispersa não pode exceder a concentração indicada nas Figuras 19 e 20 da API 1104 (2010) e neste caso é necessário a utilização de ensaios por ultrassom, o que, mais uma vez, não é o foco desta pesquisa.

O Teste 12, apresenta falta de fusão entre passes nas três posições e constata-se a presença de poros na posição vertical. Nota-se também que a posição vertical possui o aspecto achatado, ou seja, com maior largura. Por meio de mensuração no software de tratamento de imagem, certifica-se que nenhum dos poros do Teste 12 possuem dimensão individual maior que 3 mm, não sendo portanto, considerado um defeito para esta seção transversal. A maior dimensão encontrada com o auxílio do software é de 0,85 mm.

O Teste 13, apresenta falta de fusão entre passes e lateral e também a presença de um poro na posição plana. Este poro possui dimensão de 0,4 mm e está conforme a API 1104 (2010). A falta de fusão entre passes está presente na posição vertical e sobre cabeça e além disso a posição sobre cabeça apresenta falta de fusão lateral. Observa-se que há o desalinhamento da junta na posição sobre cabeça o que pode ter agravado a falta de fusão nesta posição.

Partindo da premissa que para o ensaio de enchimento é necessária uma corrente eficaz maior que 177 A, além do grande número de falta de fusão existentes nos testes anteriores e aliado a isso do Teste 14 possuir o mesmo parâmetro do Teste 13, o Teste 14 não foi analisado macrograficamente. Portanto, mesmo inclinando a tocha 15 graus (Teste 13) não se conseguiu sanar o problema.

Nenhum dos passes de raiz apresentou falta de fusão lateral, validando os parâmetros que foram determinados nos ensaios preliminares. Destaca-se também que todas as raízes apresentaram penetração completa e em relação à concavidade da solda na posição sobre cabeça, esta é aceitável em qualquer comprimento desde que não haja falta de penetração. Portanto o parâmetro apresentado na Tabela 27 é recomendado para este tipo de junta e concorda com o envelope operacional apresentado no Capítulo 2.

Não foi avaliado a altura do reforço, pois, todos os testes não estão conforme as exigências da API 1104 (2010), portanto, não estão aptos a realização de ensaios mais detalhados.

Os resultados obtidos por meio de macrografia estão de acordo com Scotti et al. (2013), em que, correntes eficazes abaixo de 177 A para passe de enchimento aparecem falta de fusão e correntes acima de 198 A para passe de raiz confirma-se a não presença de falta de fusão lateral nesta configuração de junta.

Neste sentido, poder-se-ia trabalhar com maiores tempos de parada lateral, mas em um sistema mecanizado de maior robustez, já que o sistema utilizado não permite tal característica (parada lateral). Outro ponto normalmente levantado na literatura é o uso de CO<sub>2</sub> puro como gás de proteção como abordagem para resolver o problema da falta de fusão. Entretanto, conforme resultados de Scotti et al. (2013), não é possível obter uma condição robusta para o gás CO<sub>2</sub> puro, pois a tendência ao escorrimento na posição 15 horas é muito alta.

Embora o passe de raiz seja o mais difícil e crítico, conforme citado por Vargas et al. (2011), 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.

#### **5.2.4 Oscilogramas**

Nas Figuras 99 a 104 seguintes, são exemplificados os oscilogramas do passe de raiz e enchimento para o Teste 12 para a posição plana, vertical e sobrecabeça. Os demais oscilogramas relativos aos testes analisados por macrografia encontram-se no Apêndice IX.

Os oscilogramas estão de acordo com as formas de onda para a transferência por curto-circuito em função do comportamento da gota nas três posições, conforme visto no Item 2.2.1.

Ainda com relação aos oscilogramas, observa-se a redução da frequência de curto-circuito durante a progressão descendente, que gera um ruído/som característico durante a soldagem, onde a frequência sonora vai diminuindo conforme a soldagem avança da posição 12 horas (plana) para a 18 horas (sobrecabeça).

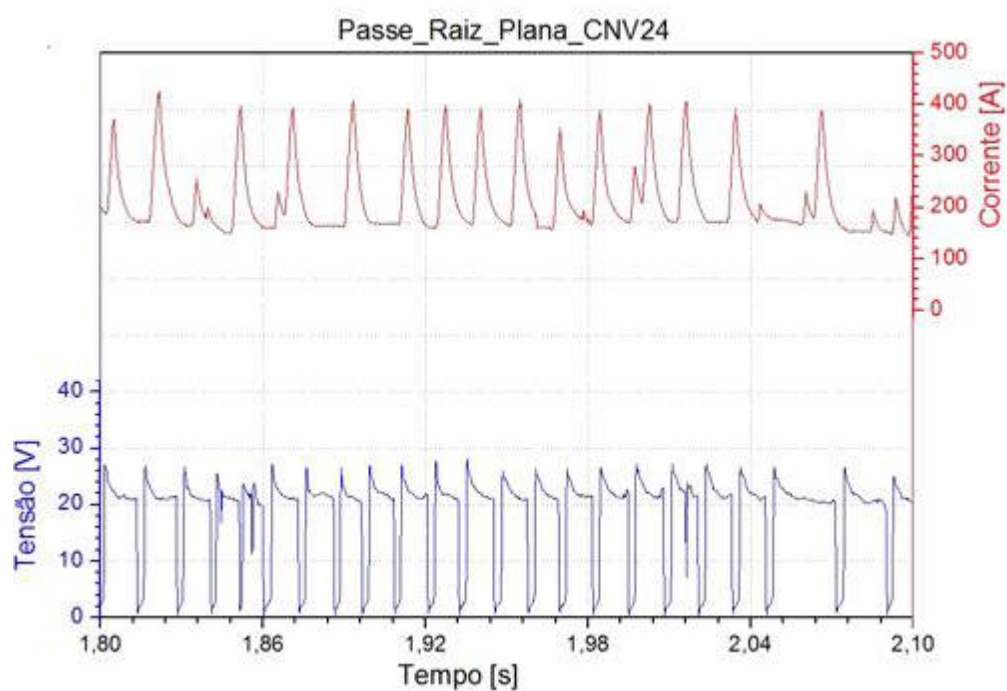


Figura 99. Oscilograma da posição plana em função do passe de raiz executado com o processo convencional (Teste 12)

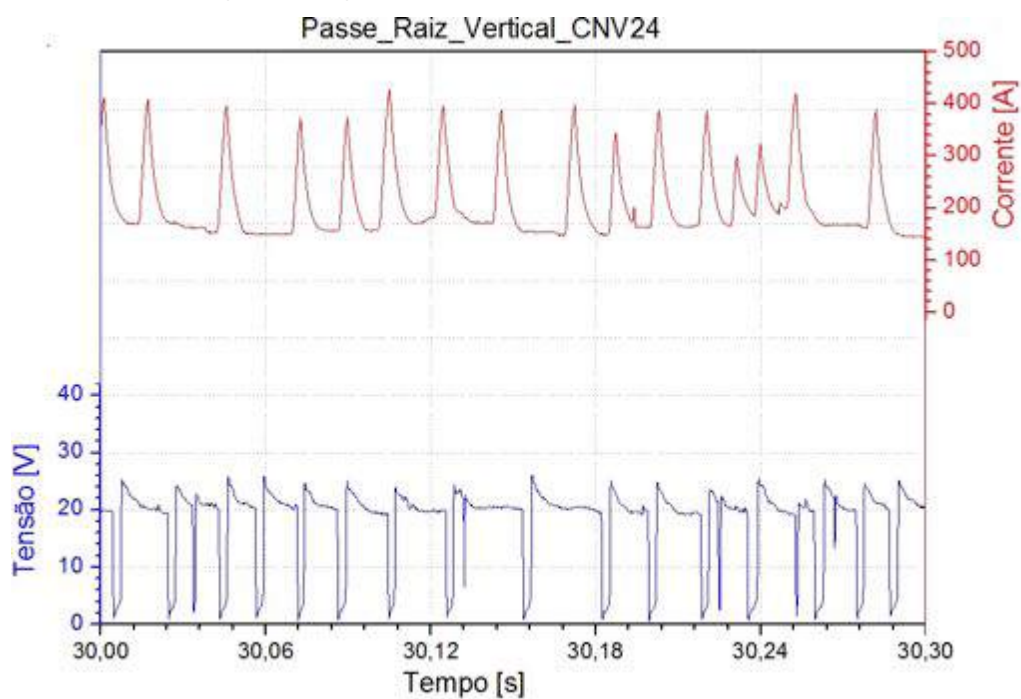


Figura 100. Oscilograma da posição vertical em função do passe de raiz executado com o processo convencional (Teste 12)



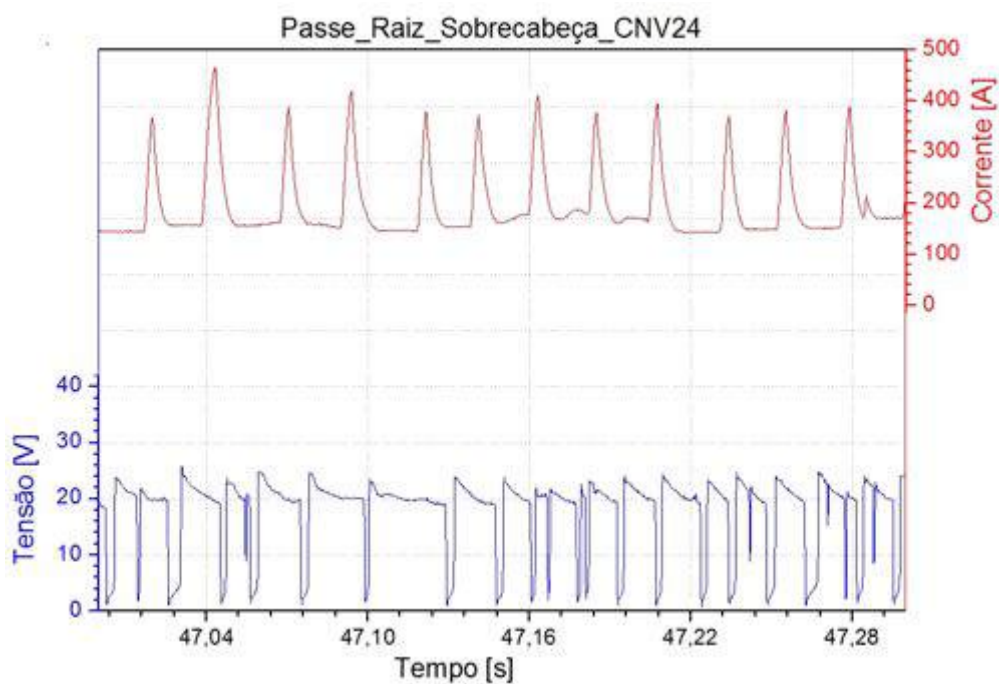


Figura 101. Oscilograma da posição sobrecabeça em função do passe de raiz executado com o processo convencional (Teste 12)

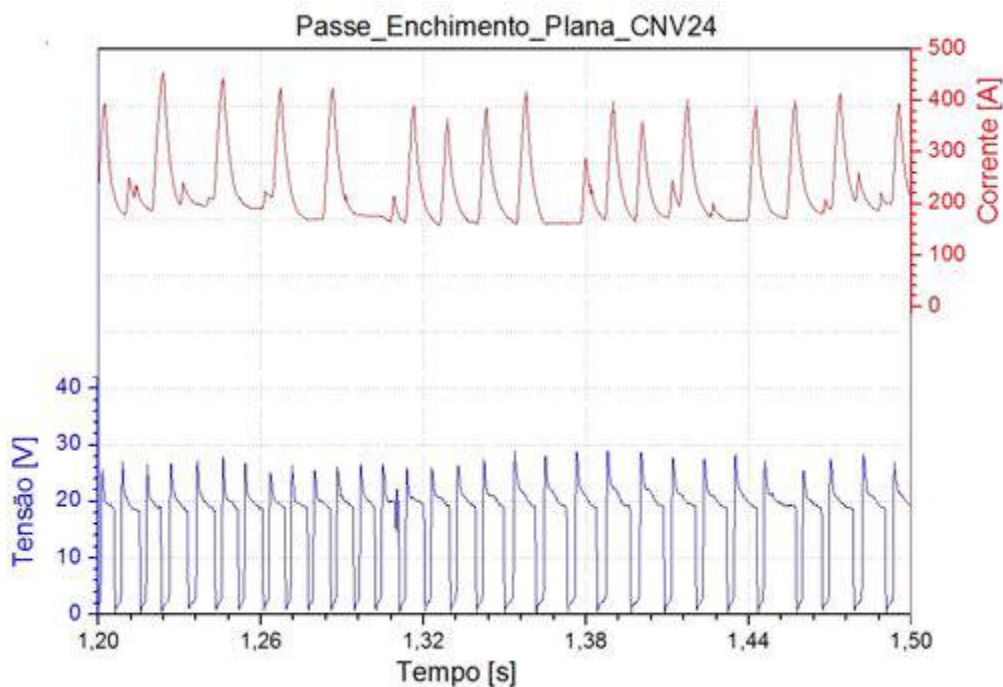


Figura 102. Oscilograma da posição plana em função do passe de enchimento executado com o processo convencional (Teste 12)

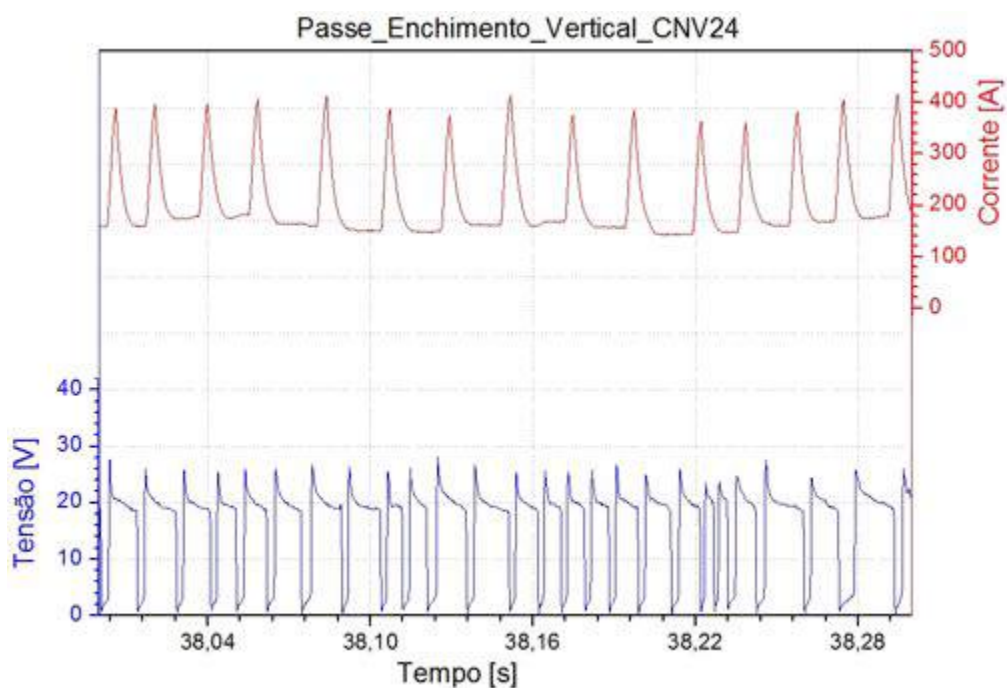


Figura 103. Oscilograma da posição vertical em função do passe de enchimento executado com o processo convencional (Teste 12)

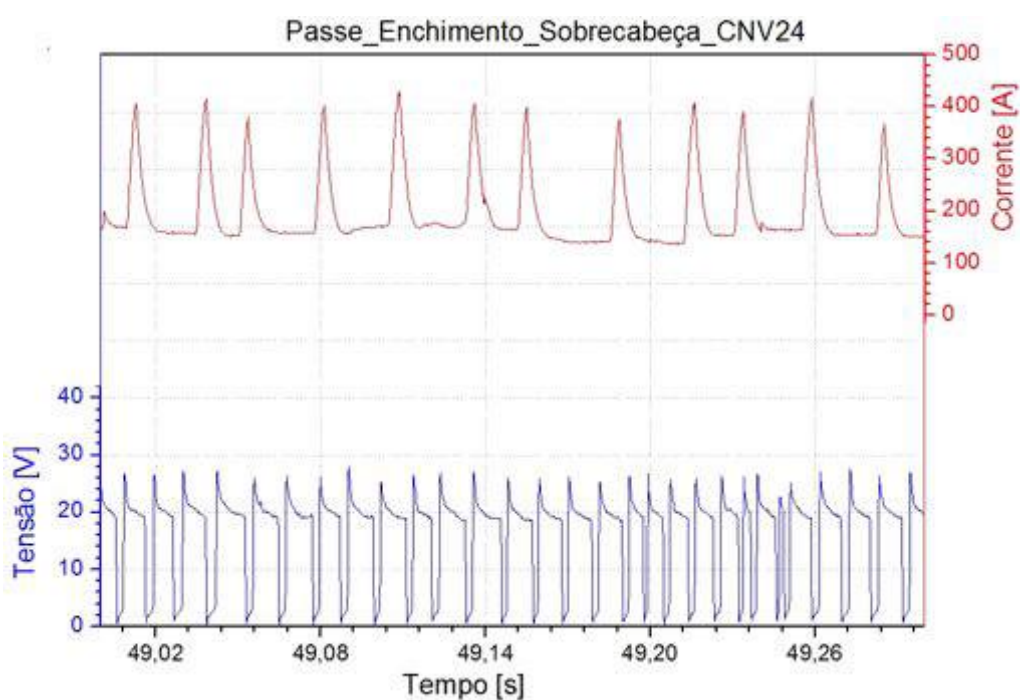


Figura 104. Oscilograma da posição sobrecabeça em função do passe de enchimento executado com o processo convencional (Teste 12)

### 5.3 Processo GMAW curto-circuito controlado (STT)

#### 5.3.1 Determinação dos parâmetros para o passe de raiz

Conforme visto no Item 4.3.2, o parâmetro final do passe de raiz utilizado para suportar o passe subsequente de enchimento/acabamento pode ser visto na Tabela 29.

Tabela 29. Parâmetros finais do processo derivativo (STT) para o passe de raiz

Va (m/min)	Vs (cm/min)	Amplitude de tecimento (mm)	Frequência de tecimento (Hz)	Ib (A)	Ip (A)	Tout (s)	Burnback time (s)	DBCP (mm)
5,75	35*	3	3,6	130	350	10	0,03	12

\*A velocidade de soldagem parametrizada no console do Tartilope foi de 45 cm/min.

A Figura 105 e Figura 106 mostram o aspecto da raiz executado com o processo STT para o melhor conjunto de parâmetros. Pela observação da Figura 105 é possível verificar que o processo derivativo (STT) gera pouco respingo, para o conjunto de parâmetros selecionado, em relação ao processo convencional (Figura 90).



Figura 105. Detalhes do passe de raiz interno ao tubo executado com o processo GMAW por curto-circuito derivativo (STT)



Figura 106. Detalhes do passe de raiz lado externo ao tubo executado com o processo GMAW por curto-circuito derivativo (STT)

Já a Figura 106 mostra uma razoável concavidade na parte superior do cordão. Segundo Vargas (2011) uma razoável concavidade é favorável para a deposição do passe seguinte, uma vez que, uma superfície convexa pode originar falta de fusão ou inclusões entre a parte lateral do cordão convexo e a parede do chanfro na realização do passe seguinte.

A análise de porosidade, falta de fusão, dentre outros são realizados em conjunto com o passe de enchimento (Item 5.3.2 e 5.3.3) para os melhores cordões selecionados por meio de inspeção visual.

### 5.3.2 Determinação dos parâmetros para o passe de enchimento

O passe de enchimento/acabamento é o passe executado após o passe de raiz. Os parâmetros utilizados na execução dos passes de raiz que suportam os passes de enchimento nestes ensaios foram mostrados na Tabela 29.

A Tabela 30 apresenta os parâmetros do processo derivativo (STT) utilizados nos ensaios para o passe de enchimento. Além dos parâmetros mantidos fixos para todos os processos mencionados no Item 5.1 nos ensaios de enchimento, outros parâmetros permaneceram constantes, dentre eles, são citados: a distância bico contato peça (DBCP) de 12 mm e o burnback em 0,03 s. Os ensaios realizados, assim como os valores de regulagem e os valores medidos de corrente média (Im), tensão média V(m), corrente RMS



(Irms) e tensão RMS (Vrms) para o passe de enchimento são apresentados na Tabela 30. Estes valores foram calculados pelo programa de Curto3 (Anexo 1).

Conforme mostrado na Figura 67, a distância entre os chanfros na face exterior do tubo é de 6,75 mm. Portanto, a amplitude de tecimento em todos os testes foi fixada em 4,0 mm ( $\pm 2,0$  mm).

Destaca-se que os passes de enchimento aqui descritos foram depositados sobre passes de raiz executados e validados para valores de corrente e tensão eficaz muito próximos aos respectivos valores atingidos nos ensaios preliminares, sendo eles 246 A e 17,4 V.

De acordo com Scotti et al. (2013), menores valores de corrente de soldagem em dutos API 5L X65 de 8" em chanfro com bisel de 15° e nariz 1 mm, foram obtidos em ensaios com o processo derivativo (STT), assim como para o processo convencional, durante o passe de enchimento/acabamento, comparativamente com os outros dois processos derivativos (CMT e RMD) investigados por esses autores, a tendência à ocorrência de uma solda “mais fria” é maior, o que pode levar à falta de fusão.

Tabela 30. Parâmetros utilizados nos passes de enchimento do processo derivativo (STT)

Teste	Identificação da amostra	Va (m/min)	Vs** (cm/min)	Inclinação da tocha (°)	Im (A)	Irms (A)	Vm (V)	Vrms (V)	IVcc
1	STT11	4,5	23,5	0	196	226	15,1	17,1	0,98
2	STT3	4,5	28,2	0	188	217	15,3	17,2	0,92
3	STT1	4,5	21,5	0	183	212	15,8	17,7	1,26
4	STT5	4,2	28,2	0	175	206	16,0	17,8	1,02
5	STT4	4,3	28,2	0	189	217	15,3	17,3	0,47
6	STT12	4,3	21,5	0	177	204	15,9	17,8	1,38
7	STT6	4,4	28,2	0	192	221	15,0	17,0	0,87
8	STT7	4,4	28,2	0	192	222	15,1	17,1	1,31
9	STT8	4,4	27,0	0	181	208	15,6	17,5	0,90
10	STT14	4,4	22,7	0	187	216	15,5	17,5	1,22
11	STT13	4,4	22,3	0	191	221	15,2	17,1	1,12
12	STT16	4,4	22,3	0	195	223	15,3	17,5	1,03
13	STT15	4,4	22,3	0	187	216	15,5	17,5	1,22
14	STT18	4,4	22,3	0	203	235	14,7	16,9	0,77
15	STT17	4,4	22,3	0	204	236	14,6	16,8	0,76
16	STT19	4,4	22,3	15	203	234	14,9	17,1	0,88
17	STT20	4,4	22,3	15	200	229	15,2	17,3	0,74

\*Os parâmetros amplitude do tecimento = 4 mm, frequência de tecimento = 2,5 Hz, DBCP = 12 mm, Ib = 100 A, Ip = 320 A e Tout = 8 foram mantidos constantes.

\*\*A velocidade de soldagem parametrizada no console do Tartilope é dada por Vs\*1,277.

Dessa forma, a estratégia adotada aqui foi de aumentar a velocidade de alimentação e produzir uma resposta de corrente eficaz maior que 198 A com aproximadamente 18,4Vrms, uma vez que estes resultados mínimos colaboraram para o aparecimento de falta de fusão lateral em análises macrográficas realizadas por Scotti et al. (2013).

Em comum acordo com a determinação dos cálculos de velocidade de soldagem do passe de enchimento, apresentado no Item 4.2, a Tabela 31 apresenta os valores da altura “h” (entre a superfície do passe de raiz externo ao duto e a superfície do metal de base exterior ao duto) para os passes de raiz que irão suportar o passe de enchimento.

Dos passes de raiz executados na posição plana, nota-se pelos valores apresentados na Tabela 31 que o menor volume de preenchimento foi de aproximadamente 55% (Teste 8 do passe de enchimento) e o maior de 75% (Teste 15 do passe de enchimento) do volume total da junta. Magalhães (2012) determina que se a relação de  $V_a/V_s$  é de aproximadamente 16,42 o preenchimento da junta é de aproximadamente 50%, o que não aconteceu. Tal fato é agravado, principalmente na posição sobrecabeça, onde a atuação da força gravitacional em conjunto com o escorrimento, favorecem ao maior preenchimento da junta. Portanto, para os cálculos da velocidade de soldagem será utilizado a média das alturas “h” nas três posições, uma vez que, a soldagem é executada com um único conjunto de parâmetros (Tabela 31).

Pela análise da Tabela 31, cada posição de soldagem resulta em passes de raiz com diferentes alturas, mesmo se executadas com o mesmo parâmetro, pois, cada soldagem tem suas particularidades. As particularidades aqui citadas podem ser em função de alguma decisão tomada pelo operador durante a execução do procedimento de soldagem, desvios no acabamento superficial do chanfro, ovalização do tubo, dentre outros.

Em seguida são apresentadas e discutidas as fotos dos cordões de solda correspondentes ao ensaio realizado apenas para os testes que ilustram as dificuldades e os bons resultados obtidos.

Para o Teste 1, tentou-se extrapolar o valor de velocidade de alimentação conseguida por Scotti et al. (2013) em 0,5 m/min com o intuito de aumentar a resposta de corrente, conforme visto no Item 2.2.2.1. Também pode ser visto no referido item que a corrente de pico, a corrente de base e o “Tail out” podem influenciar na penetração. Costa (2011) propõe que a corrente de base varie entre 60 A e 100 A, e a corrente de pico varie entre 280 A e 320 A para soldas de único passe. Magalhães (2012) afirma que uma corrente de base entre 50 A e 100 A mantém o arco e contribui para o aquecimento do metal de base. Por esse motivo decidiu-se por manter os valores sugeridos por Scotti et al. (2013) como ponto de partida (Tabela 2).

Tabela 31. Valores da altura “h” dos passes de raiz que suportam os passes de enchimento/acabamento (Tabela 30) para o processo derivativo (STT)

Identificação da amostra	Altura "h" até borda (plana)	Altura "h" até borda (vertical)	Altura "h" até borda (sobrecabeça)	Média
STT1	2,02	1,55	1,01	1,53
STT3	2,01	1,53	1,06	1,53
STT4	2,02	1,52	1,05	1,53
STT5	2,50	0,60	0,01	1,04
STT6	3,20	1,60	0,70	1,83
STT7	3,60	1,10	0,50	1,73
STT8	3,40	2,40	0,90	2,23
STT11	3,00	1,30	1,11	1,80
STT12	3,10	1,60	1,00	1,90
STT13	3,30	0,90	2,00	2,07
STT14	3,20	1,30	1,10	1,85
STT15	3,00	1,80	0,90	1,90
STT16	2,70	1,80	1,00	1,83
STT17	2,00	1,60	0,90	1,50
STT18	2,80	2,20	1,80	2,27
STT19	2,90	2,40	1,60	2,30
STT20	2,50	1,90	0,90	1,77

No Teste 1, conseguiu-se completar o cordão de solda com muito pouco respingo (Figura 107). Entretanto, houve escorrimento na posição vertical e sobrecabeça. Nesse teste, a corrente RMS foi de 226 A e tensão RMS média de 17,1 V, ou seja, conseguiu-se o objetivo de aumentar a resposta da corrente RMS média aumentando a velocidade de alimentação.

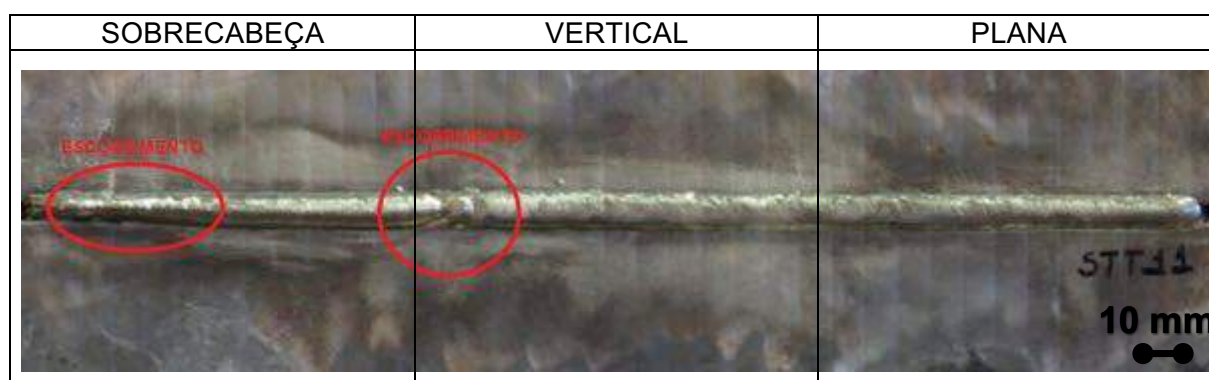


Figura 107. Cordão de solda do Teste 1: passe de enchimento com  $V_s = 23,5$  cm/min e  $V_a = 4,5$  m/min ( $V_a/V_s = 19,1$ ) com ângulo de inclinação da tocha em  $0^\circ$



No Teste 2, a fim de sanar o problema do escorrimento, decidiu-se em aumentar a velocidade de soldagem para 28,2 cm/min mantendo a velocidade de alimentação anterior e assim diminuir a energia imposta. A finalidade de impor menor quantidade de calor é diminuir a molhabilidade e assim tentar impedir escorrimento. Mas, observou-se o mesmo escorrimento na posição sobrecabeça (Figura 108).

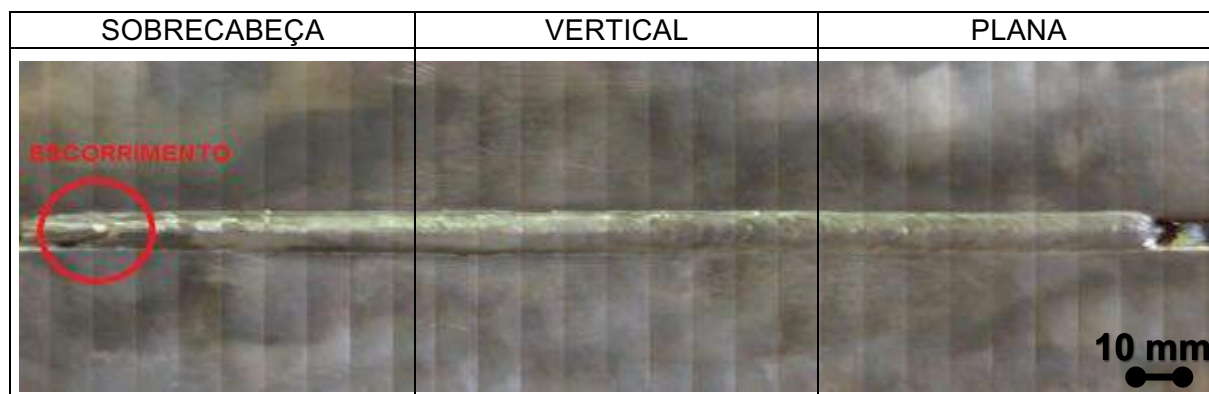


Figura 108. Cordão de solda do Teste 2: passe de enchimento com  $V_s = 28,2$  cm/min e  $V_a = 4,5$  m/min ( $V_a/V_s = 16,0$ ) com ângulo de inclinação da tocha em  $0^\circ$

Para o Teste 3, optou-se em diminuir a velocidade de soldagem para 21,5 cm/min (cálculo da velocidade de soldagem decrescida de aproximadamente 15%) para verificar o resultado e como resposta observou-se um escorrimento na posição vertical e um reforço de 3,3 mm na posição sobrecabeça (Figura 109).

Durante a soldagem do Teste 3, notou-se que a poça de fusão fica à frente do arame na transição entre a posição plana e vertical, ocasionando o escorrimento. Conforme mostrado no Item 2.3.2, uma das dificuldades de soldagem na posição 5G é controlar o escorrimento principalmente na posição vertical.

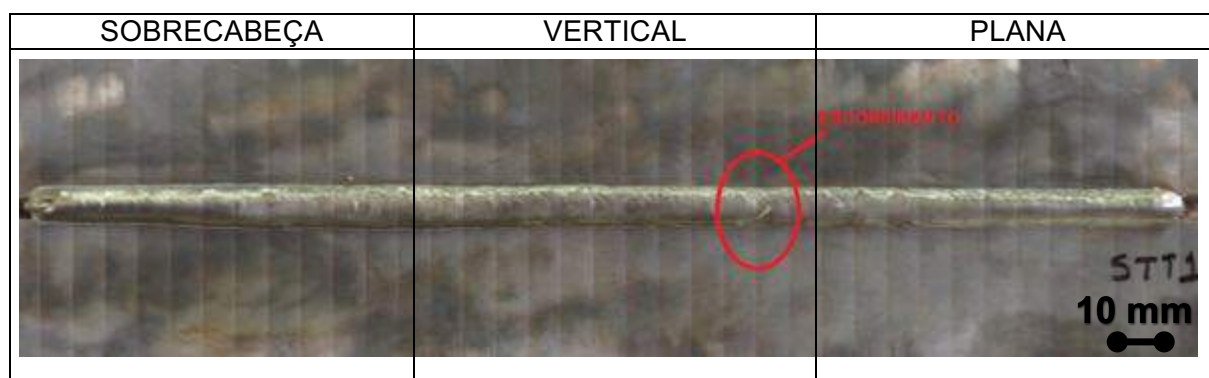


Figura 109. Cordão de solda do Teste 3: passe de enchimento com  $V_s = 21,5$  cm/min e  $V_a = 4,5$  m/min ( $V_a/V_s = 20,93$ ) com ângulo de inclinação da tocha em  $0^\circ$

Até o presente momento é possível concluir que existe uma velocidade de soldagem certa para um dado conjunto de parâmetros, de forma que na transição entre a posição plana e vertical, a poça de fusão adquira a molhabilidade ideal, fazendo com que a poça de fusão não ultrapasse o arame entre as posições plana e vertical e consequentemente impeça a escorrimento na posição vertical. Sabe-se também que diminuindo a velocidade de soldagem e mantendo o mesmo conjunto de parâmetros o cordão se alarga e o reforço aumenta nas três posições (Tabela 32).

Para o Teste 4, reduziu-se a velocidade de alimentação para 4,2 m/min (mantendo-o acima de 4,0 m/min) com o intuito de completar a soldagem e verificar se é possível soldar com velocidades de alimentação acima de 4,0 m/min. Esta tentativa não obteve sucesso, pois, na posição sobrecabeça verifica-se a presença de escorrimento em dois pontos causados pela desestabilização da poça de fusão (Figura 110).

Tabela 32. Dimensões das faces dos cordões de solda dos Testes 1, 2 e 3

Teste	Identificação da amostra	Posição	Reforço de face (mm)	Largura da face (mm)
1	STT11	Plana	2,46	9,4
		Vertical	1,48	10,8
		Sobrecabeça	3,2	10,3
2	STT3	Plana	0,58	8,7
		Vertical	0,72	9,64
		Sobrecabeça	2,64	9,06
3	STT1	Plana	2,8	9,6
		Vertical	1,52	10,94
		Sobrecabeça	3,3	10,56

Durante a execução do Teste 4, constatou-se que a velocidade de soldagem de 28,2cm/min não segurou a poça de fusão na transição entre as posições vertical e sobrecabeça. Não se descarta o efeito do sistema de movimentação (Tartilope V4), pois o tecimento pode não ter sido realizado de forma apropriada levando a desestabilização da poça de fusão.

No Teste 4, a corrente RMS foi de 206 A. Portanto, é necessário aumentar a velocidade de soldagem para aumentar a resposta em corrente. Este é um ponto crucial da pesquisa, pois, utilizando velocidades de alimentação de 4,2 m/min e 4,5 m/min aconteceram escorrimentos. Mesmo assim, continuou-se com o objetivo inicial de aumentar a corrente de alimentação para verificar qual velocidade de alimentação atenderia um significativo aumento de corrente.

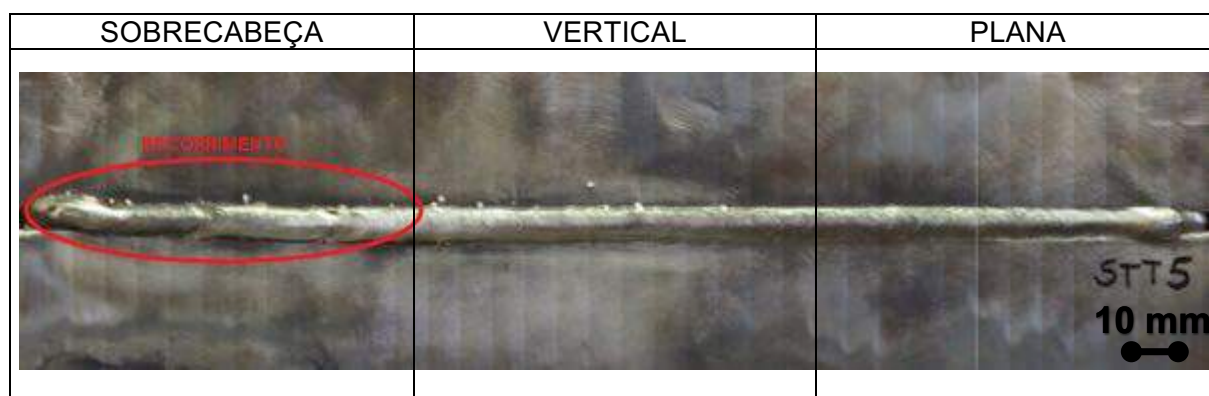


Figura 110. Cordão de solda do Teste 4: passe de enchimento com  $V_s = 28,2$  cm/min e  $V_a = 4,2$  m/min ( $V_a/V_s = 14,9$ ) com ângulo de inclinação da tocha em  $0^\circ$

No Teste 5, aumentou a velocidade de alimentação de 4,3 m/min e manteve-se a mesma velocidade de soldagem anterior de 28,2 cm/min. Observa-se apenas um ponto de escorrimento na posição sobrecabeça (Figura 111) e aparentemente houve uma melhora em relação ao Teste 4. O nível de corrente eficaz é satisfatório e foi da ordem de 217 A e a tensão RMS foi de 17,3 V.

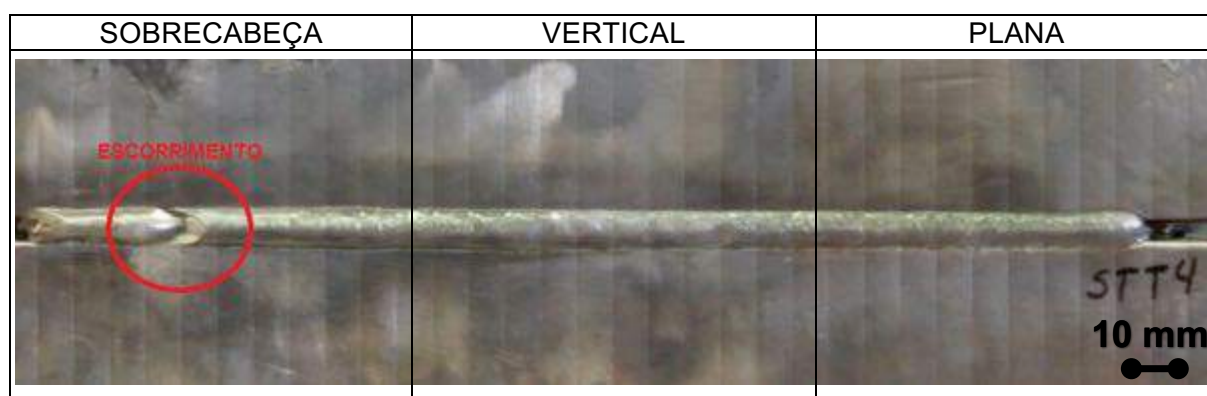


Figura 111. Cordão de solda do Teste 5: passe de enchimento para  $V_s = 28,2$  cm/min e  $V_a = 4,3$  m/min ( $V_a/V_s = 15,2$ ) com ângulo de inclinação da tocha em  $0^\circ$

Neste contexto de aumentar a relação entre velocidade de alimentação e velocidade de soldagem, no Teste 6 diminuiu-se a velocidade de soldagem para 21,5 cm/min (velocidade calculada) mantendo a mesma velocidade de alimentação anterior (4,3 m/min). Observa-se também escorrimentos na posição vertical (Figura 112), de forma semelhante ao ocorrido no Teste 3 (Figura 109).

Nos testes apresentados até aqui para o passe de enchimento utilizando-se processo derivativo (STT), nota-se que para as soldagens realizadas, onde a relação  $V_a/V_s$  é maior ou igual a 20,00, ocorre o escorrimento na transição entre a posição plana e vertical e parte da posição vertical, não ocorrendo escorrimento na posição sobrecabeça. Já para a

relação entre  $V_a/V_s$  menores que 20,00, ocorre o escorrimento na transição entre a posição vertical e sobrecabeça estendendo até o fim do cordão e não apresenta o escorrimento na transição entre a posição plana e vertical e parte da posição vertical.

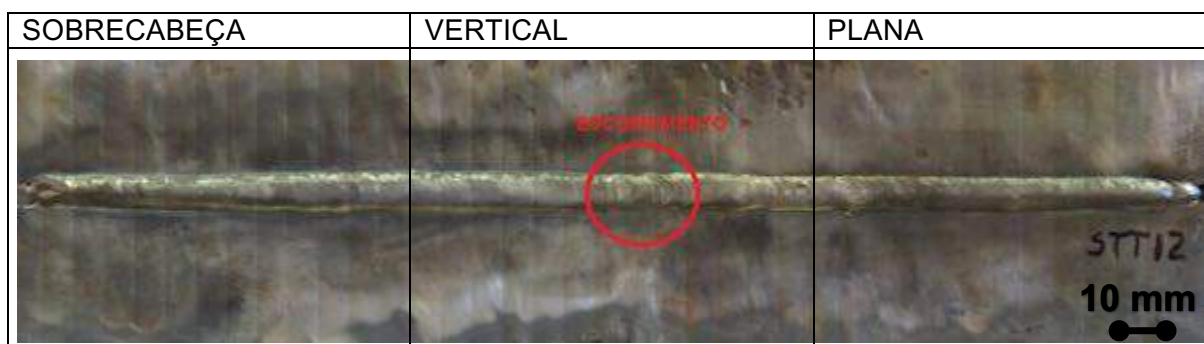


Figura 112. Cordão de solda do Teste 6: passe de enchimento para  $V_s = 21,5$  cm/min e  $V_a = 4,3$  m/min ( $V_a/V_s = 20,00$ ) com ângulo de inclinação da tocha em  $0^\circ$

Dessa forma, afim de certificar as observações feitas de que a relação  $V_a/V_s$  é um divisor de tendências, foram executados os Testes 7 e 8 com velocidades de soldagem de 28,2 cm/min e de alimentação de 4,4 m/min, ou seja, uma relação  $V_a/V_s = 15,60$ . Nesses Testes 7 e 8, observa-se o escorrimento apenas na sobrecabeça (Figura 113), conforme esperado e discutido no parágrafo anterior. Foi produzido um cordão estreito na posição plana e o reforço nas posições planas e verticais é da ordem de 0,8 mm e 1,5 mm, respectivamente. Os valores de corrente e tensão foram também satisfatórios, sendo de 221 A e 17,0 V para o Teste 7 e de 222 A e 17,1 V para o Teste 8.

Para se confirmar essa tendência ao escorrimento, no Teste 9, diminuiu-se a velocidade de soldagem para 27,0 cm/min, mantendo a velocidade de alimentação em 4,4m/min, obtendo a relação  $V_a/V_s$  em 16,30. Mais uma vez, também ocorreu o escorrimento na sobrecabeça (Figura 114). Observa-se a formação de um cordão estreito na posição plana e o reforço nas posições planas e verticais é da ordem de 1,0 mm e 1,7 mm, respectivamente.

Para o Teste 10, manteve a velocidade de alimentação em 4,4 m/min e diminuiu-se a velocidade de soldagem para a calculada conforme Eq. 19 em 22,7 m/min ( $V_a/V_s = 19,38$ ). Nesse Teste 10, a resposta em corrente e tensão foi de 216 A e 17,5 V, portanto, com maior valor de corrente. O escorrimento ocorreu apenas na posição sobrecabeça (Figura 115).



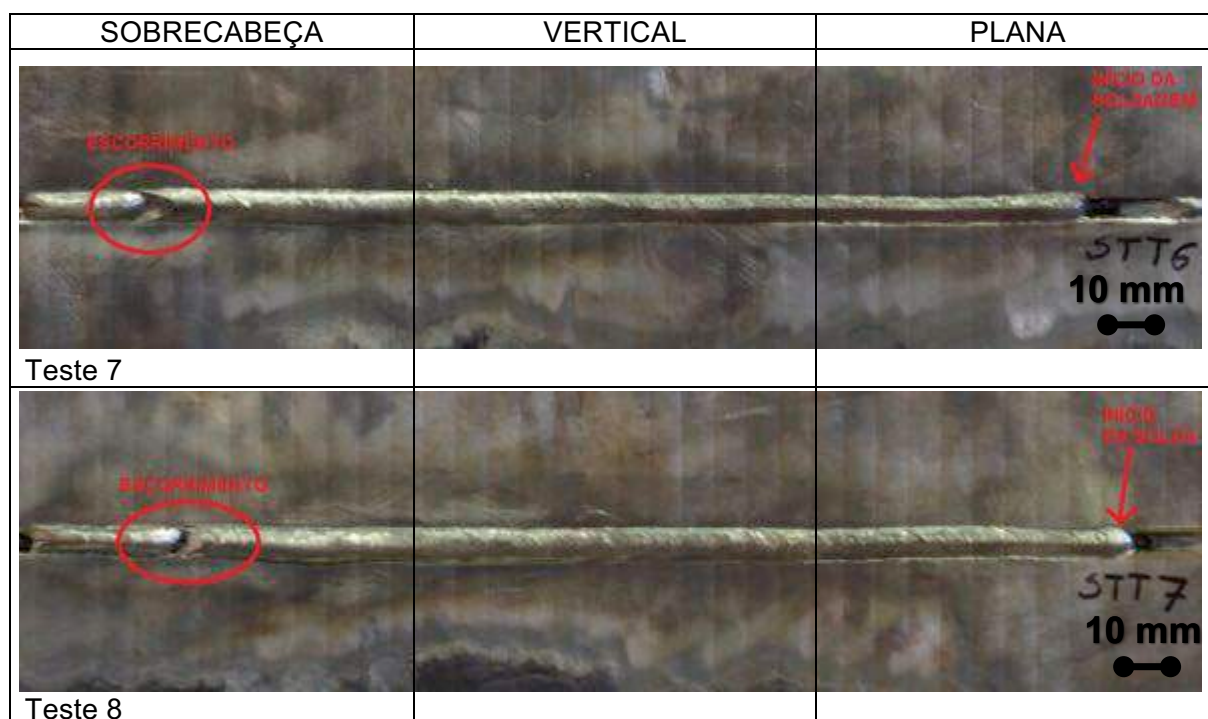


Figura 113. Cordões de solda do Teste 7 e 8: passe de enchimento para  $V_s = 28,2$  cm/min e  $V_a = 4,4$  m/min ( $V_a/V_s = 15,60$ ) com ângulo de inclinação da tocha em  $0^\circ$

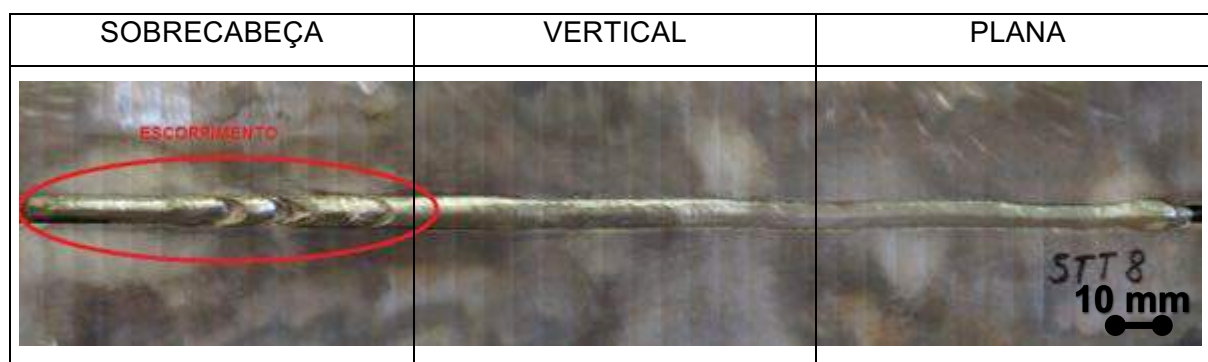


Figura 114. Cordão de solda do Teste 9: passe de enchimento para  $V_s = 27,0$  cm/min e  $V_a = 4,4$  m/min ( $V_a/V_s = 16,30$ ) com ângulo de inclinação da tocha em  $0^\circ$

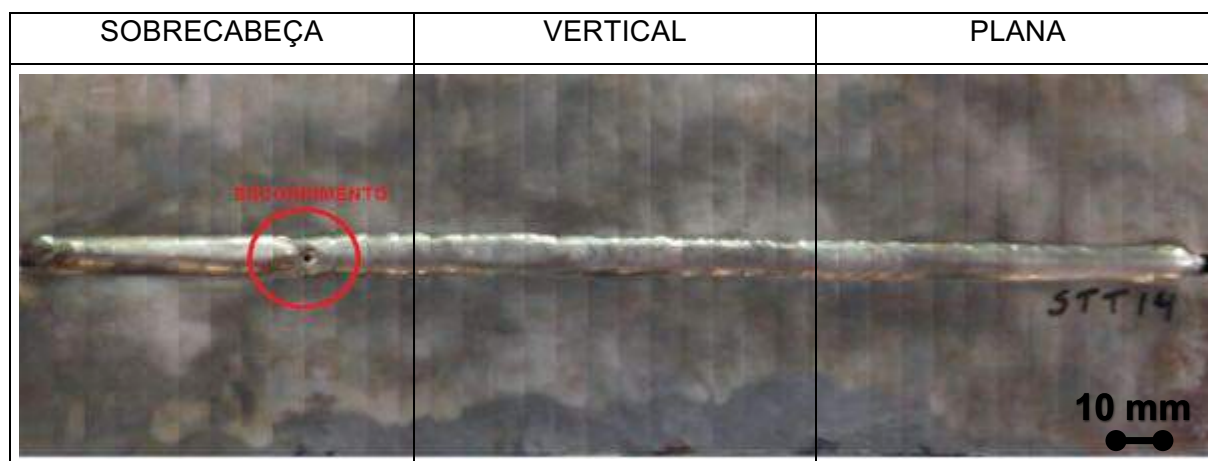


Figura 115. Cordão de solda do Teste 10: passe de enchimento para  $V_s = 22,7$  cm/min e  $V_a = 4,4$  m/min ( $V_a/V_s = 19,38$ ) com ângulo de inclinação da tocha em  $0^\circ$

Observando-se a Tabela 33, que apresenta o resumo dos pontos de escorrimento relacionado aos testes e comparando-se o Teste 10 ( $V_a/V_s = 19,38$ ) e o Teste 1 ( $V_a/V_s = 19,10$ ), que apresentaram escorrimento na posição sobrecabeça, com o Teste 3 ( $V_a/V_s = 20,93$ ) e Teste 6 ( $V_a/V_s = 20,00$ ), em que o escorrimento foi próximo a posição vertical, é possível afirmar que a relação  $V_a/V_s$ , que provavelmente não apresentará o escorrimento, estaria na faixa entre 19,38 e 20,00. Esta afirmação se deve ao fato de que, uma vez que abaixo de 19,38 ocorreram escorrimientos na transição entre vertical e sobrecabeça e igual ou acima de 20,00 ocorreram apenas na transição entre as posições plana e vertical e na posição vertical. Dessa forma, constata-se que é uma faixa estreita de possibilidade.

A partir da afirmação feita no parágrafo anterior, o Teste 11 utiliza velocidade de alimentação 4,4 m/min e velocidade de soldagem 22,3 cm/min de forma que a relação  $V_a/V_s$  seja de 19,73 (entre 19,38 e 20,00). Nesse Teste 11 conseguiu-se completar o cordão sem a presença de escorrimientos (Figura 116), mas o cordão foi descartado, pois, apresentou erro por parte do operador que desviou o cordão de solda para um dos lados da junta na posição sobrecabeça. A resposta em corrente e tensão eficazes foi de 221 A e 17,1V.

Tabela 33. Resumo de escorrimientos relacionado aos testes de enchimento com processo derivativo (STT)

Teste	POSIÇÃO DO ESCORRIMENTO (DEFEITO)					$V_a$ (m/min)	$V_s$ (m/min)	Relação $V_a/V_s$
	Plana	Transição Plana/Vertical	Vertical	Transição Vertical/Sobre- cabeça	Sobre- cabeça			
1				X	X	4,5	30	19,10
2					X	4,5	36	16,00
3		X				4,5	28	20,93
4					X	4,2	36	14,90
5					X	4,3	36	15,20
6			X			4,3	28	20,00
7					X	4,4	36	15,60
8					X	4,4	36	15,60
9					X	4,4	34,5	16,30
10					X	4,4	29	19,38

Assim, foi realizado o Teste 12, com os mesmos parâmetros do Teste 11, para verificar que não há presença de escorrimientos durante a sua execução da soldagem e garantir a robustez desse parâmetro. Nesse Teste 12, confirmou-se novamente o não escorrimento em nenhuma das três posições (Figura 117). Os valores de corrente e tensão eficazes foram de 223 A e 17,5 V, respectivamente e, portanto, satisfatórios.

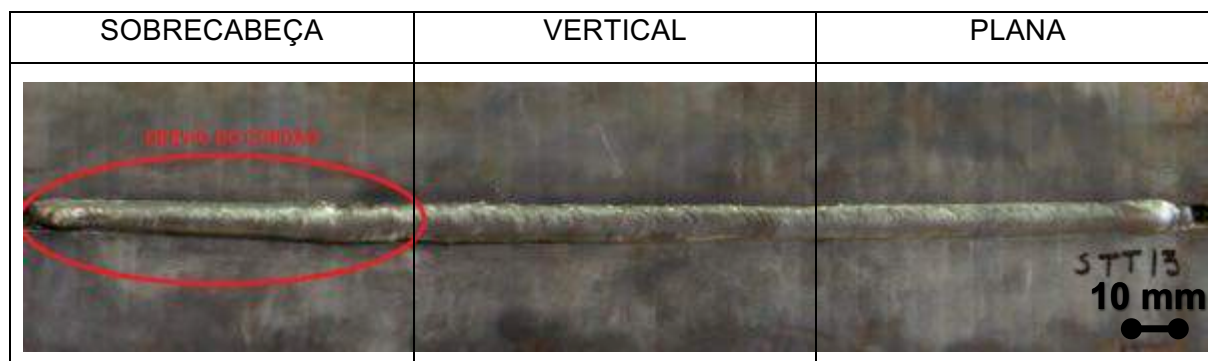


Figura 116. Cordão de solda do Teste 11: passe de enchimento para  $V_s = 22,3$  cm/min e  $V_a = 4,4$  m/min ( $V_a/V_s = 19,73$ ) com ângulo de inclinação da tocha em  $0^\circ$

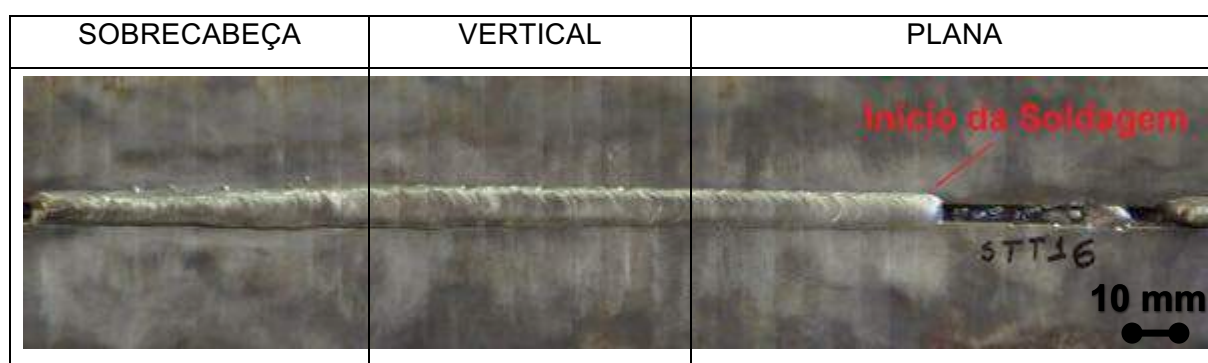


Figura 117. Cordão de solda do Teste 12: passe de enchimento para  $V_s = 22,3$  cm/min e  $V_a = 4,4$  m/min ( $V_a/V_s = 19,73$ ) sem defeitos com ângulo de inclinação da tocha em  $0^\circ$

A partir desses resultados, foram produzidos mais 6 cordões de solda (3 passes de raiz e 3 passes de enchimento completando 3 meias-canais) com os parâmetros dos Testes 11 e 12, destinadas aos ensaios, mecânicos e macrografia, nomeadas aqui de Testes 13, 14 e 15, de forma a se verificar a robustez do conjunto de parâmetros pela sua repetibilidade.

Segundo Costa (2011), na soldagem descendente, para reduzir o escorrimento da poça de fusão na posição vertical, pode-se utilizar a tocha com ângulo de ataque negativo (puxando), na medida em que promove o aumento da penetração. Tanto o ângulo da tocha positivo (empurrando), quanto o ângulo negativo (puxando) proporcionaram também o aumento da penetração. Dessa forma, foram realizados também testes com os mesmos parâmetros dos Testes 11 e 12, mas com a tocha inclinada em  $15^\circ$  (puxando) para o passe de enchimento. Não foi possível executar soldas com a tocha empurrando, pois, a partir da transição entre as posições planas e vertical se estendendo até a sobrecabeça houve escorrimentos, para os mesmos parâmetros dos Testes 11 e 12.

O aspecto do cordão de solda para os Testes 16 e 17 é mostrado na Figura 118. Observou-se que durante a execução da soldagem, o arco se estabilizou melhor para a



relação  $V_a/V_s$  igual a 19,73 e houveram poucos respingos. Percebeu-se também que a movimentação da tocha com ângulo de inclinação de  $15^\circ$  puxando auxilia em segurar a poça nas posições verticais e sobrecabeça como forma de compensação da força gravitacional. A resposta de corrente e tensão eficazes o Teste 16 e 17 foram respectivamente de 234 A e 17,1 V e 229 A e 17,3V. Em função dos maiores valores de corrente atingidos, os Testes 16 e 17 foram analisados por macrografia.

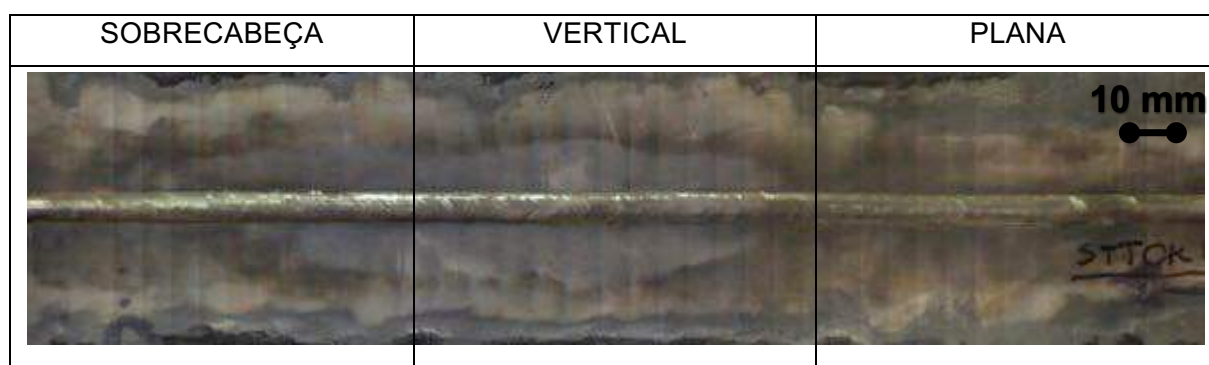


Figura 118. Cordões de solda dos Teste 16 e 17: passe de enchimento para  $V_s = 22,3$  cm/min e  $V_a = 4,4$  m/min ( $V_a/V_s = 19,73$ ) com ângulo de inclinação da tocha em  $15^\circ$  (puxando)

Destaca-se que os cordões dos Testes 13, 14, 15, 16 e 17 estão livres de trincas e mordeduras e, portanto, de acordo com a API 1104 (2010). A relação  $V_a/V_s$  que proporcionou a execução de um cordão de solda sem escorrimento e com resposta em corrente satisfatória foi de 19,73 com velocidade de alimentação de 4,4 m/min. Para a relação  $V_a/V_s$  acima de 19,73 podem ocorrer escorrimentos na posição vertical e na transição entre a posição plana e vertical. Para relações  $V_a/V_s$  menores que 19,73, podem ocorrer escorrimentos na posição sobrecabeça.

Ainda com respeito à tendência de escorrimento, além da correlação entre escorrimento e relação  $V_a/V_s$ , vale observar também a correlação entre a regularidade da transferência metálica por curto circuito e o escorrimento observado na poça fundida. Para tanto, conforme visto no Item 2.2.3, o Índice de Regularidade (IVcc), calculado por meio do programa “Curto3”, expressa a constância da transferência metálica, sendo que quanto menor seu valor, maior é a regularidade dessa transferência. Assim, por exemplo, ao se comparar os Testes 2 e 7 (Tabela 30), nota-se que o Teste 2, embora possuindo uma maior velocidade de alimentação, apresentou menor corrente de soldagem se comparado ao Teste 7. Isto se deve ao fato da maior regularidade do Teste 7 (IVcc = 0,87 contra 0,92 do Teste 2), ou seja, extinções e reignições mais suaves do arco elétrico. A extinção súbita do

arco no curto-circuito ocorre por causa da ponte metálica formada entre o eletrodo e a poça de fusão (durante este tipo de extinção, a corrente é alta e a tensão é baixa). Após o rompimento da ponte metálica, pode acontecer de momentaneamente não se ter condições adequadas para a reignição do arco, levando a outro “distúrbio”, denominado extinção do arco devido à falha de reignição (nesta extinção, a corrente é nula e a tensão é alta) (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

Dessa forma, nos testes em que houveram escorrimentos, a poça de fusão pode ter prolongado o tempo de curto-circuito durante o seu acúmulo ou causado a falha de reignição do arco devido a escorrimentos momentâneos fora de posição, interferindo assim nos resultados de corrente e tensão. Como outro exemplo dessa observação, tem-se os Testes 2 e 5, que possuem correntes próximas, mas verifica-se que o  $IV_{cc}$  é diferente, sendo o  $IV_{cc}$  do Teste 2 aproximadamente o dobro do Teste 5, justificando a maior regularidade do Teste 5, o que levou a uma corrente igual para uma menor velocidade de alimentação.

Para maior detalhamento da correlação entre o  $IV_{cc}$  e a presença de soldas com defeitos de escorrimento, ou mesmo outros defeitos, é necessário realizar filmagem de alta velocidade e comparar com os oscilograma. Destaca-se que este estudo não é o objetivo da presente pesquisa.

Por fim, a Figura 119 e Figura 120 apresentam os aspectos superficiais dos cordões de solda para os passes de acabamento/enchimento executados com o processo derivativo (STT) durante o Teste 13 e Teste 17, respectivamente. Observa-se o excelente acabamento superficial do cordão de solda nas três posições, pouca geração de “escória” (característico do processo GMAW) e pouca geração de respingos. Nestas fotos é possível perceber que o reforço aumenta da posição plana em direção a sobrecabeça.

Destaca-se que apesar da solução encontrada caminhar no sentido do aumento da velocidade de alimentação, o que causa aumento do reforço, poder-se-ia trabalhar com tempos de parada lateral, mas em um sistema mecanizado de maior robustez, pois com o equipamento utilizado esta solução não é possível.

Neste contexto, fica claro que para cada posição de soldagem é necessário variar os parâmetros de soldagem gerais (velocidade de soldagem, velocidade de alimentação, e etc.) e particulares de cada processo de soldagem dinamicamente para se ajustar a variações aleatórias, tanto para o passe de raiz como para o passe de enchimento. Demonstrando a dificuldade de soldar com um único conjunto de parâmetros.

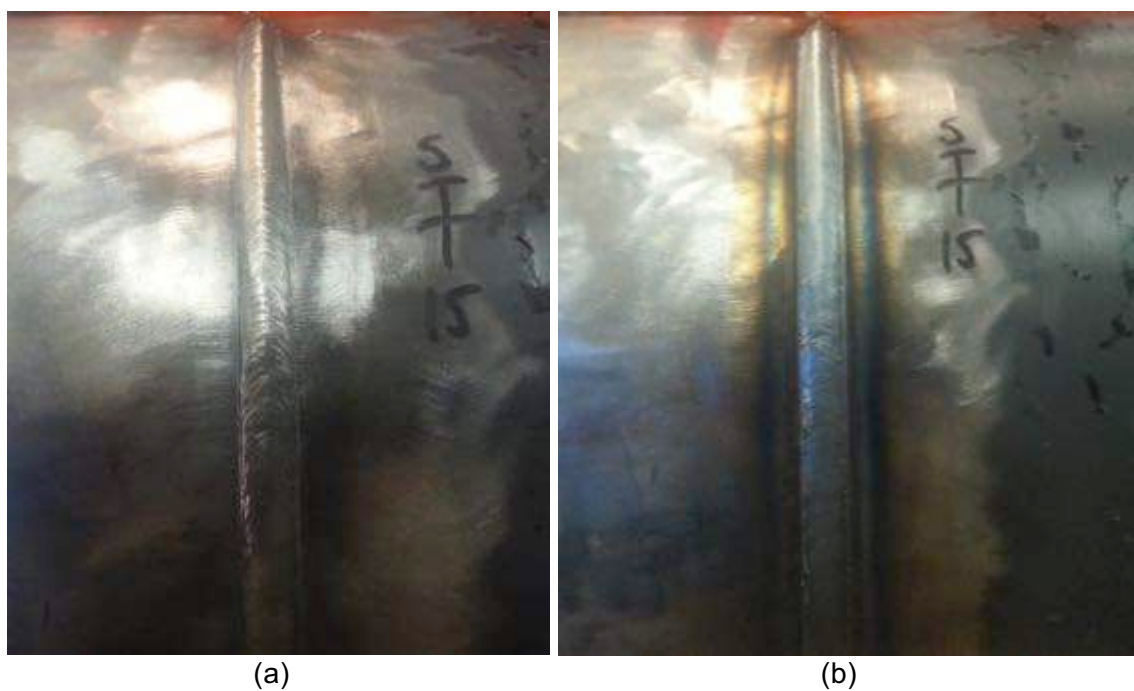


Figura 119. Aspecto superficial do cordão de solda para o passe de acabamento/enchimento com ângulo de ataque da tocha  $0^\circ$  para o Teste 13: (a) após limpeza; (b) antes da limpeza

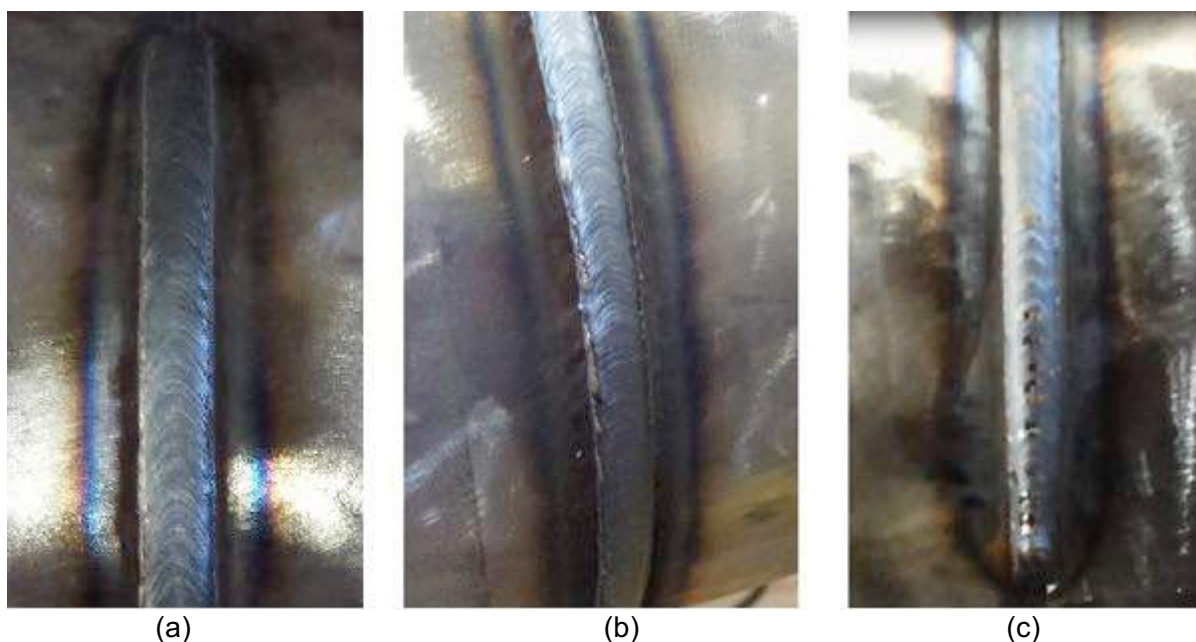


Figura 120. Aspecto superficial do cordão de solda para o passe de acabamento/enchimento executado com o processo derivativo (STT) com ângulo de ataque da tocha  $15^\circ$  para o Teste 17: (a) posição plana (b) posição vertical (c) posição sobrecabeça

### 5.3.3 Critérios de aceitabilidade

#### 5.3.3.1 Análise visual

Avaliou-se a qualidade superficial dos cordões para detectar e analisar visualmente a possível presença de descontinuidades, tanto para o passe de raiz, como para o passe de enchimento com os critérios exigidos pela API 1104 (2010).

Conforme mencionado, os cordões selecionados para a macrografia são aqueles em que a corrente eficaz para o passe de raiz foi igual ou superior 246 A, para o passe de enchimento superior a 198 A e com a qualidade superficial exigida pela API 1104 (2010).

A relação  $Va/Vs$  que proporcionou a execução de um cordão de solda sem escorrimientos e com resposta em corrente satisfatória foi de 19,73 na velocidade de alimentação 4,4 m/min para o passe de enchimento. Para relação  $Va/Vs$  acima de 19,73 ocorreram escorrimientos na posição vertical e na transição entre a posição plana e vertical. Para relação  $Va/Vs$  menores que 19,73 podem ocorrer escorrimiento na posição sobrecabeça.

Não foi possível completar a execução do cordão para a maioria dos conjuntos de parâmetros propostos na Tabela 30, pois, apresentaram escorrimientos. Nos Testes 3 e 6 os escorrimientos foram na transição entre a posição plana e vertical, já nos Testes 1, 2, 4, 5, 7, 8, 9 e 10 os escorrimientos se apresentaram na transição entre a posição vertical e sobrecabeça e na sobrecabeça. O Teste 11 não apresentou escorrimientos, mas apresentou erro de execução. Já o Teste 12 executado com os mesmos parâmetros do Teste 11 pode confirmar a robustez e o não escorrimiento desse esse parâmetro.

Ambos os cordões (raiz e enchimento) dos Testes 13, 14, 15, 16 e 17 executados nos ensaios de enchimento estão livres de trincas, mordeduras, e portanto, à primeira vista de acordo com a API 1104 (2010). Os Testes 16 e 17 foram realizados com a tocha inclinada em 15° puxando e com os mesmos parâmetros dos Testes 13, 14 e 15.

Dessa forma, os Testes 13, 14 e 17 foram examinados macrograficamente, pois, à primeira vista estão em conformidade com a API 1104 (2010). O Teste 12 também foi analisado macrograficamente, embora, sua execução deva-se apenas para confirmação do resultado do Teste 11.

Destaca-se que os ensaios apresentados aqui são os mais significativos e outros ensaios com os mesmos parâmetros foram executados para confirmar os resultados.

### 5.3.3.2 Análise macrográfica dos cordões: processo derivativo (STT)

A Figura 121 apresenta as macrografias obtidas para cada uma das posições de soldagem (12 horas – plana, 15 horas – vertical descendente e 18 horas – sobrecabeça) dos cordões de solda produzidos nos Testes 12,13 e 14 (tocha inclinada em  $0^\circ$ ) e a Figura 122, Figura 123 e Figura 124, as macrografias do Teste 17 (tocha inclinada em  $15^\circ$ ).

Embora o processo derivativo (STT) aparenta ter uma boa qualidade superficial dos cordões produzidos, as macrografias revelaram imperfeições internas. Deve-se ressaltar que tais imperfeições foram denominadas como “A” para falta de fusão entre passes, “B” para a presença de poros, “C” para falta de fusão lateral entre metal de adição e metal base e “D” para falta de fusão entre passes e lateral. As seções transversais foram analisadas por meio do programa de tratamento de imagem (*ImageJ*).

Teste	Posição		
	12 horas	15 horas	18 horas
(Teste 12) STT16			
(Teste 13) STT15			
(Teste 14) STT18			

Figura 121. Macrografias dos cordões de solda para o processo STT com ângulo de inclinação da tocha em  $0^\circ$  (espessura da chapa: 8,0 mm)



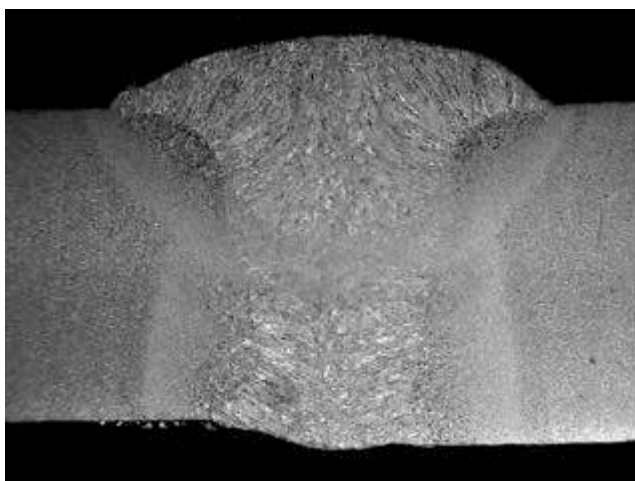


Figura 122. Macrografia do cordão de solda para a posição plana do Teste 17: processo derivativo (STT) e ângulo de inclinação da tocha em 15° (espessura da chapa: 8,0 mm)

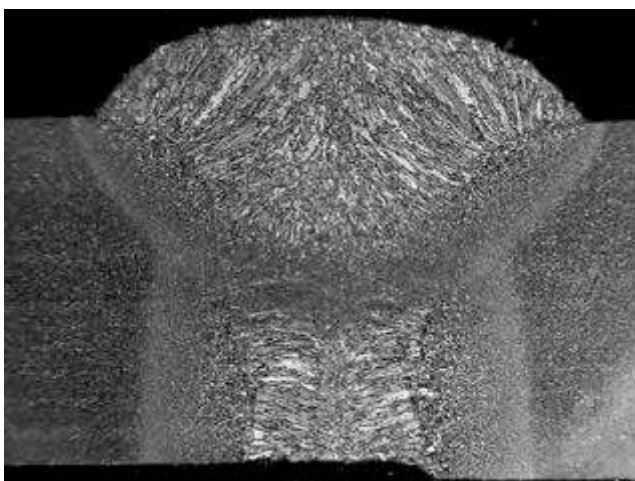


Figura 123. Macrografia do cordão de solda para a posição vertical do Teste 17: processo derivativo (STT) e ângulo de inclinação da tocha em 15° (espessura da chapa: 8,0 mm)

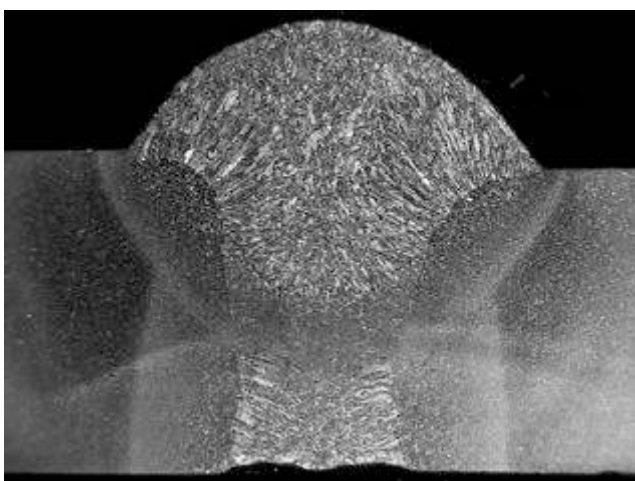


Figura 124. Macrografia do cordão de solda para a posição sobrecabeça do Teste 17: processo derivativo (STT) e ângulo de inclinação em 15° (espessura da chapa: 8,0 mm)

Como definido no Item 2.3.1 e discutido no Item 5.2.3.2, por não realizar ensaio de ultrassom, toda imperfeição será considerada um defeito nas macrografias que apresentarem falta de fusão lateral ou entre passes, independente da sua extensão, sendo o cordão de solda descartado, uma vez que, nos ensaios mecânicos a amostra possa ser reprovada.

No Teste 12, constata-se a presença da falta de fusão entre passes na posição vertical (Figura 121). Já no Teste 13, observa-se defeitos de falta de fusão lateral nas três posições e entre passes na posição vertical e sobre cabeça (Figura 121). É notado que na posição vertical o cordão possui aspecto achatado, ou seja, com maior largura. Este aspecto está de acordo com estudos de Rossi (2011), que ressalta em seus resultados que cordões executados na direção descendente tendem a apresentar maior largura, sendo evidente na posição vertical (posição de maior irregularidade).

No Teste 14, na posição vertical constata-se a presença de um (1) poro (Figura 121). Entretanto, como descrito no Item 9.3.9.2 da API 1104 (2010) e observado na Tabela 3 do Item 2.4.1, a porosidade, para ser considerada um defeito, deve exceder individualmente a 3mm. Neste caso, percebe-se visualmente e por meio de mensuração que o poro possui dimensão de 0,7 mm e, portanto, não é considerado um defeito para esta seção transversal.

Por apresentar uma imperfeição optou-se pelo descarte do Ensaio 14. Logo, os Testes 12, 13 e 14 estão descartados e não estão aptos aos ensaios mecânicos.

O Teste 17 (Figura 122, Figura 123 e Figura 124) não apresentou defeito em nenhuma das três posições analisadas, estando livre de falta de fusão, falta de penetração, mordeduras e portanto em conformidade com a API 1104 (2010) e apto aos ensaios mecânicos. Nota-se na posição sobre cabeça (Figura 124) um leve excesso de reforço, mas inevitável devido a soldagem ser realizada com um único conjunto de parâmetros.

Conforme API 1104 (2010), o reforço é considerado excessivo quando possui mais de 3 mm na face e mais de 2 mm na raiz, como garantia da qualidade da produção de junta soldada. Portanto, na posição sobre cabeça, uma opção seria o esmerilhamento desse reforço para soldas de campo. O fator limitante aqui foi a capacidade do processo em aumentar a corrente para eliminar os defeitos.

Destaca-se nas imagens (Figuras 121 a 124), a boa qualidade do passe de raiz, onde a concavidade de raiz existente está de acordo com a API 1104 (2010), pois tal 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, mesmo ocorrendo estas descontinuidades na raiz mostradas na Figura 121 (Testes 12 e 14 na



posição sobre cabeça) e na Figura 124 (Teste 17 na posição sobre cabeça), pois os ensaios de dobramento de raiz e tração, apresentados a seguir (Item 5.3.3.4), foram todos aprovados.

Por outro lado, é possível buscar melhorias no projeto da junta de forma a se reduzir esta concavidade da raiz. Por exemplo, aumentando a abertura da raiz ou aumentando o ângulo do chanfro. Entretanto, o objetivo foi estabelecer condições paramétricas para a junta especificada.

Os resultados do passe de raiz estão de acordo com estudos de Vargas et al. (2011), em que na posição plana devido a maior pressão do arco, maior força da gravidade, ajudam a empurrar a poça de solda obtendo maior penetração, maior reforço na raiz. Já na sobre cabeça, o reforço plano na raiz se reflete em maior preenchimento da junta.

A utilização do ângulo de ataque da tocha em 15° auxiliou no aumento de penetração lateral, conforme pode ser visto comparando a Figura 121 com a Figura 122, Figura 123 e Figura 124. Estes resultados estão de acordo com os estudos de Costa (2011), que notou o aumento da penetração em seus experimentos ao utilizar a tocha com ângulo de ataque negativo (puxando) em 15°.

Mesmo encontrando um único conjunto de parâmetros, os resultados do Teste 17 vão de encontro à sugestão citada por Bracarense et al. (2015), de que o processo derivativo com tecnologia STT é uma opção especialmente utilizada em soldas de raiz, espessuras finas e aplicações automatizadas. Tal hipótese pode ser levantada, pois, o processo derivativo com tecnologia STT foi aplicado em um chanfro atípico, ou seja, em condições severas, e obteve o passe de enchimento com ausência de defeitos em soldagem mecanizada.

### **5.3.3.3 Ensaio de tração**

As dimensões finais dos corpos de prova utilizados para a avaliação por ensaio de tração das soldas realizadas pelo processo derivativo (STT) são detalhadas na

Tabela 34. Ressalta-se que os valores de largura, espessura e comprimento livre devem ser informados ao software Trapezium X antes do início do ensaio. Deve-se lembrar que não foram realizados ensaios de tração para o processo convencional, pois, nenhum corpo de prova foi aprovado na etapa de macrografia.

Após a execução dos ensaios de tração, os resultados de limite de escoamento, tensão máxima e tensão de ruptura para as amostras resultantes dos Testes 16 e 17 foram encontrados e apresentados na Tabela 35. Nesta mesma tabela, estão apresentados os

valores encontrados para o metal de base para as três amostras retiradas de diferentes regiões do tubo.

Tabela 34. Dimensões dos corpos de prova fabricados para ensaio de tração uniaxial

Amostra	Quadrante	Dimensões [mm]		
		Espessura	Largura	Comprimento Livre
Teste 17	Superior (amostra T1)	7,22	25,41	80
Teste 16	Inferior (amostra T2)	7,31	25,42	80
Metal de base	Amostra 1	8,07	25,00	60
	Amostra 2	8,00	24,75	60
	Amostra 3	8,05	24,41	60

Tabela 35. Resultados dos ensaios de tração uniaxial

Amostra	Quadrante	Limite de escoamento [MPa]	Limite de resistência [MPa]	Limite de ruptura [MPa]	Elongamento [%]
Teste 17	Superior	345,0	425,0	390,0	18,1
Teste 16	Inferior	330,0	414,0	350,0	21,3
Metal de base	Amostra 1	300,0	423,2	308,0	23,5
	Amostra 2	313,6	421,1	309,5	23,5
	Amostra 3	311,1	416,1	304,2	25,0

Destaca-se que os valores nominais do aço API 5L X65, segundo a API 5L (2012) são 448 MPa para o limite de escoamento, 531 MPa para o limite de resistência e 19,6% de alongamento mínimo (calculado com base na equação indicada pela Tabela 3A da Norma API SPEC 5L e valor encontrado no apêndice D da referida norma para área de seção transversal do corpo de prova de 200 mm<sup>2</sup>).

Embora os valores encontrados estejam abaixo do especificado na norma para os limites de escoamento e resistência, os valores encontrados durante a soldagem são superiores ao metal de base para o limite de escoamento e limite de ruptura. Já o limite de resistência do corpo de prova inferior apresentou-se com valores inferiores ao do metal de base.

A Tabela 3A norma API 5L (2012), reproduzida na Tabela 36, 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 35 para o metal de base, se pode afirmar que o material analisado é o API 5L X42. Neste contexto, o valor encontrado do

limite de resistência para o metal soldado, no que se referente ao corpo de prova inferior, está respeitando o requisito mínimo deste material. Nesse ponto, deve-se recordar da análise química feita na Tabela 8 do Item 3.2.1, onde a composição química reflete àquela de um aço comum ao carbono, que realmente não possuiria maiores propriedades mecânicas.

Tabela 36. Requisitos mínimos do teste de tração (ADAPTADO DA NORMA API SPEC 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 125 são mostradas as curvas tensão-deformação obtidas durante os ensaios para as soldas feitas pelo processo derivativo (STT), conforme posição de retirada do corpo de prova, e do metal de base. Já a Figura 126 e Figura 127 apresenta o aspecto visual de cada corpo de prova após o ensaio e detalhe de sua fratura.

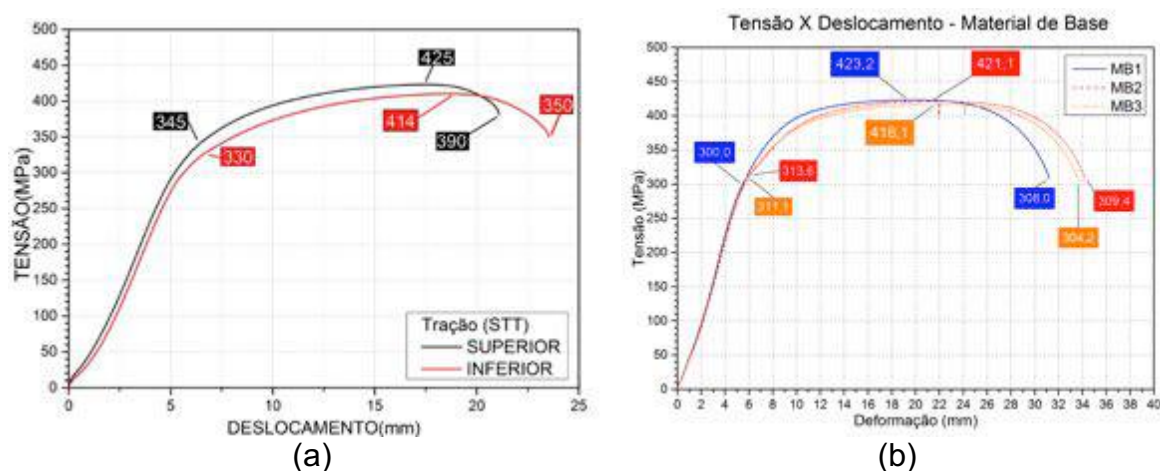


Figura 125. Curvas tensão-deformação para os ensaios de tração uniaxial: (a) metal soldado (Teste 17); (b) metal de base

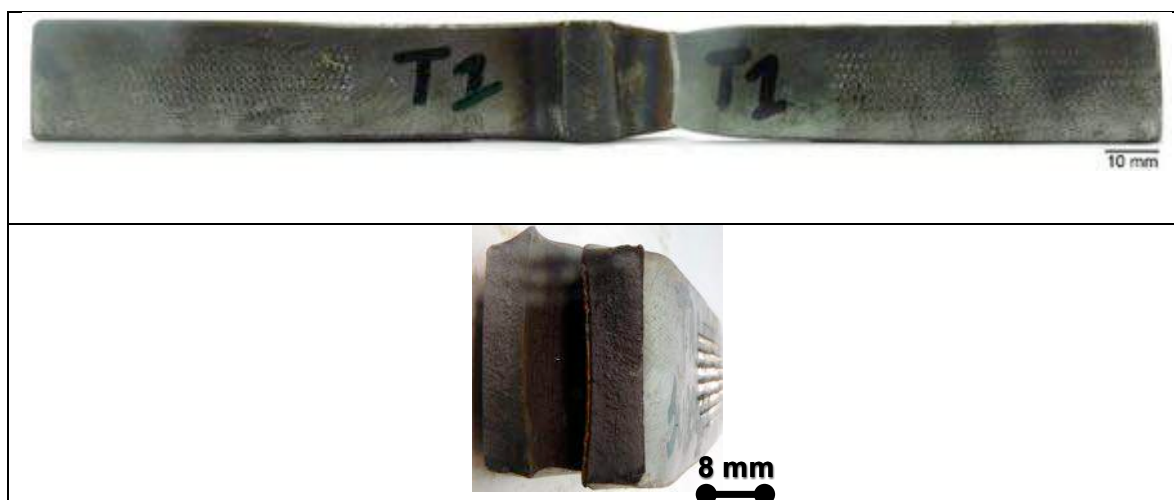


Figura 126. Aspectos visuais do corpo de prova do quadrante superior e fratura (Teste 17)

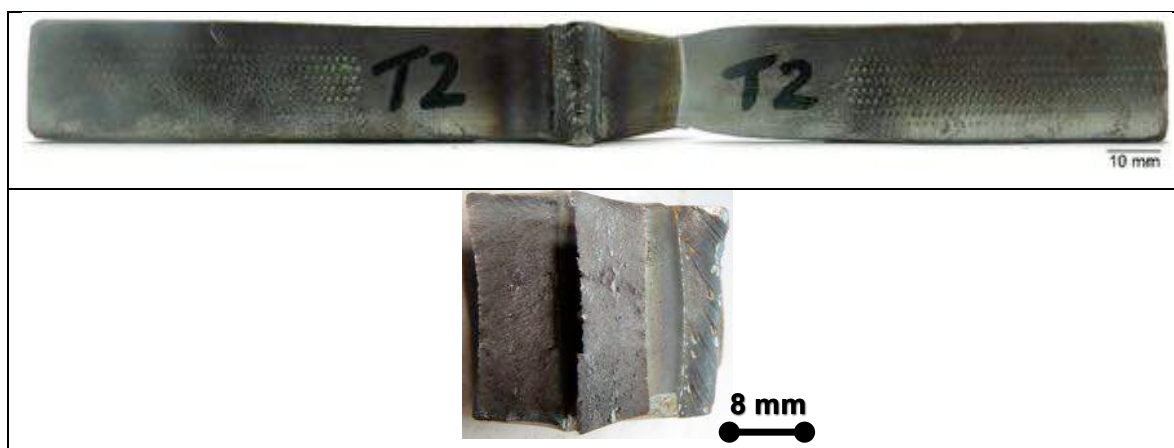


Figura 127. Aspectos visuais do corpo de prova do quadrante inferior e fratura (Teste 16)

Nota-se na Figura 126 e Figura 127 que os corpos de prova avaliados sofreram ruptura na região do metal de base a uma distância segura da zona termicamente afetada (ZAC), ou seja, fora da região do cordão de solda e da zona termicamente afetada. Levando-se em consideração as análises acima realizadas, as soldas estão aprovadas com respeito ao ensaio de tração.

#### 5.3.3.4 Ensaio de dobramento

As dimensões dos corpos de prova utilizados e a distância entre os apoios são discriminados na Tabela 37.

Tabela 37. Dimensões dos corpos de prova fabricados para ensaio de dobramento

Amostra	Quadrante	Identificação	Dimensões [mm]			
			Espessura	Largura	Comprimento	Distância dos apoios
Teste 16	Superior	(D1F)	7,58	25,28	223,0	120
	Superior	(D1R)	7,64	25,35	223,0	120
Teste 17	Inferior	(D2F)	7,59	24,96	223,0	120
	Inferior	(D2R)	7,72	25,55	223,0	120

Com relação aos resultados para o ensaio de dobramento, a Figura 128 apresenta os corpos de prova do quadrante superior e a Figura 129 do quadrante inferior com relação a região da solda (face ou raiz). Pela análise da Figura 128 e Figura 129, nota-se que todos os corpos de prova dobraram sem trincamento.

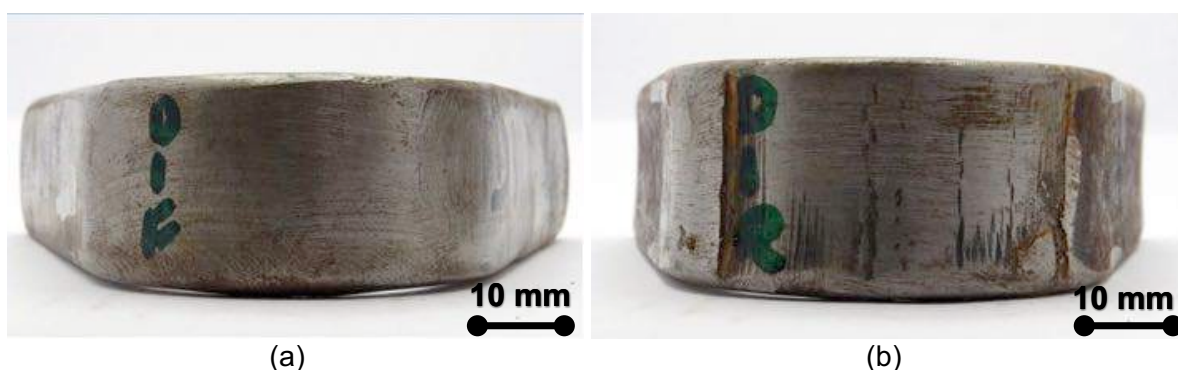


Figura 128. Corpo de prova do quadrante superior após ensaios de dobramento (Teste 16).  
(a) Dobramento de face; (b) Dobramento de raiz



Figura 129. Corpo de prova do quadrante inferior após ensaios de dobramento (Teste 17).  
(a) Dobramento de face; (b) Dobramento de raiz

Uma vez que o passe de raiz não apresentou qualquer imperfeição no dobramento de raiz, 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 descontinuidades na raiz, como concavidade da raiz da solda apresentada e discutida no item (5.3.3.2) e visto na Figura 128b e Figura 129b, os ensaios de dobramento de raiz e tração foram todos aprovados.

### 5.3.3.5 Ensaio de nick-break

A Figura 130 e Figura 131 trazem as imagens dos corpos de prova após os ensaios. Destaca-se que o centro do cordão de solda não se rompeu no primeiro impacto (Figura 47) utilizando 3 mm como entalhe lateral e de 1,6 mm no reforço na face em conformidade com a API 1104 (2010) para processo mecanizado, o que permite afirmar que há uma boa resistência mecânica da junta. Para observar internamente a solda foi necessário realizar um entalhe maior de 3 mm no reforço e de 1,6 mm na lateral no corpo de prova.

Ao se observar a fratura exposta, esta ocorreu de forma dúctil sem descontinuidades. Na fratura do corpo de prova inferior observa-se oxidações causadas pelo intervalo de tempo entre o termino do ensaio e o registro da foto. Logo, todos os corpos de prova se encontram aprovados com relação a este ensaio.

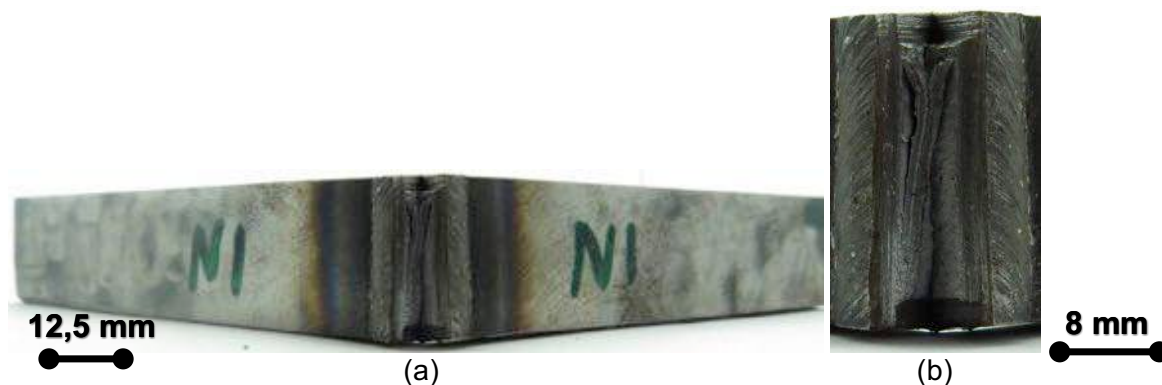


Figura 130. (a) Corpo de prova quadrante superior após ensaio de Nick-Break (teste 17); (b) Detalhe da área de ruptura

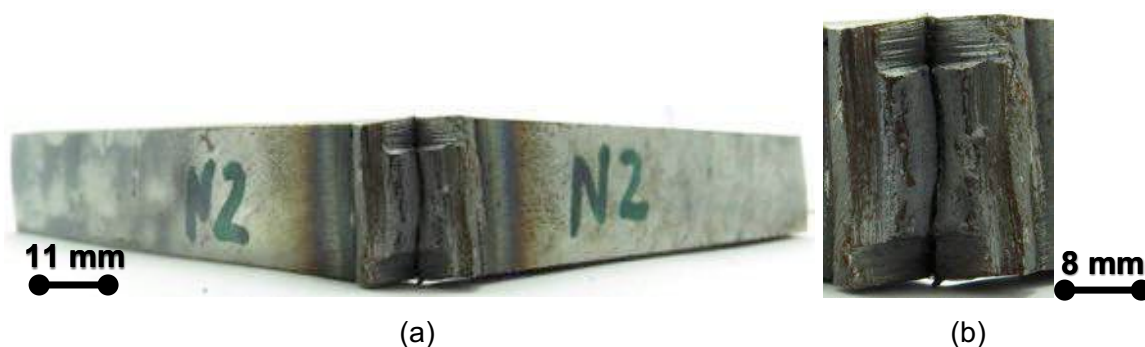


Figura 131. (a) Corpo de prova quadrante inferior após ensaio de Nick-Break (teste 16); (b) Detalhe da área de ruptura

### 5.3.3.6 Ensaio de impacto charpy

Os resultados obtidos do ensaio são apresentados na Tabela 38 e em forma gráfica na Figura 132, já corrigidos os efeitos de tamanho, conforme Item 3.3.1.5. Por estes resultados, nenhum corpo de prova apresentou energia absorvida menor que 40 J, conforme especificado na API 1104 (2010), tendo como referência a temperatura de 0 °C ou 25,6 J em -12,2 °C. Ou seja, todas as soldas estão 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.

Tabela 38. Resultados do ensaio de impacto charpy (corpo de prova - Teste 17)

Quadrante	Identificação da amostra	Energia absorvida (kgf.m)	Energia absorvida (J)	Energia absorvida média (J)	Energia absorvida desvio padrão (J)
Inferior	I1	28.9	221	205	36
Inferior	I2	21.4	164		
Inferior	I3	29.9	229		
Superior	S1	28.2	216	152	56
Superior	S2	15.0	115		
Superior	S3	16.2	124		



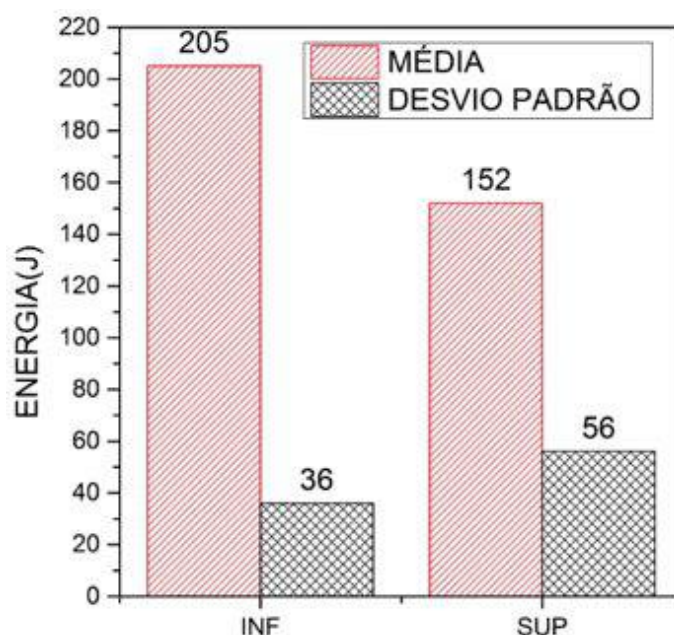


Figura 132. Energia absorvida em função do quadrante superior (SUP) e inferior (INF) - (corpo de prova - Teste 17)

Cabe destacar que em relação aos valores de energia absorvida em soldas qualificadas por Scotti et al. (2013), a Tabela 38 apresenta valores maiores de média do que nos processos derivativos de soldagem com tecnologias CMT (superior =  $184 \pm 34$  J; inferior =  $194 \pm 54$  J), RMD (superior =  $166 \pm 56$  J; inferior =  $189 \pm 36$  J) e STT (superior =  $117 \pm 6$  J; inferior =  $120 \pm 20$  J). Assim, comparando-se com o valor obtido por Scotti et al. (2013) para o mesmo processo derivativo investigado (STT), os valores da Tabela 38 foram superiores. Isto reflete o efeito da maior capacidade de absorção do impacto dos corpos de prova aqui parametrizados. Constata-se também que o desvio padrão dos resultados aproximam-se dos resultados encontrados por Scotti et al. (2013).

Além do valor da energia em si, deve-se observar o aspecto da fratura. Assim, a Figura 133 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 desta figura demonstram grande deformação antes do rompimento do corpo de prova.

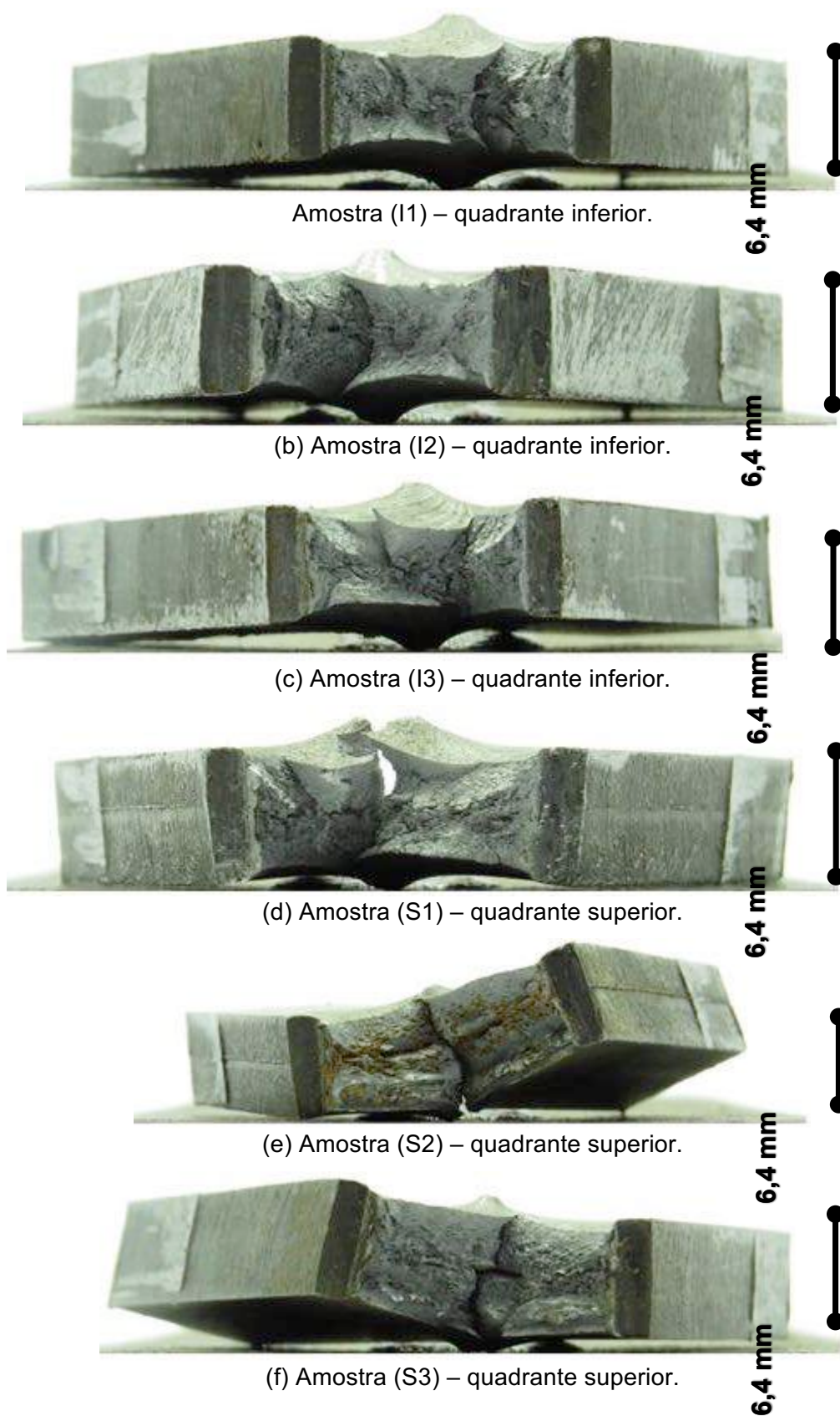


Figura 133. Detalhe das fraturas dos corpos de prova do ensaio charpy (espessura: 6,4 mm; largura: 10 mm; comprimento: 55 mm) para o Teste 17

### 5.3.3.7 Ensaio de dureza vickers

A Figura 134 apresenta os resultados obtidos para o perfil de dureza. Foram feitos ensaios na face e raiz para os corpos de prova referente ao processo derivativo (STT) na posição 12 horas, 15 horas e 18 horas, para o cordão de solda do Teste 17.

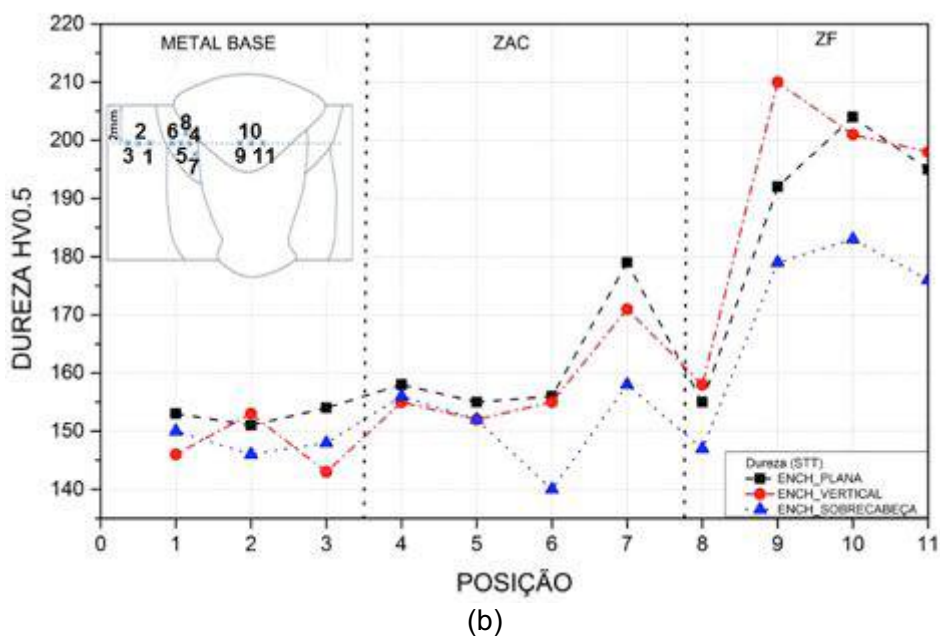
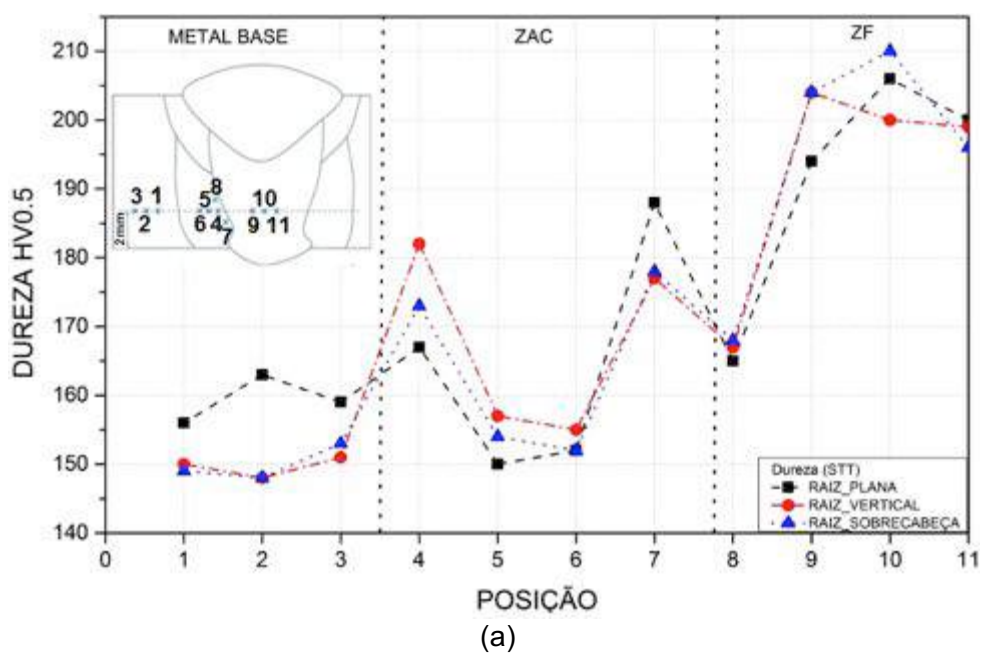


Figura 134. Valores de dureza obtidos para o passe de raiz (a) e passe de enchimento (b) do cordão de solda do Teste 17

Para os valores medidos, a maior dureza encontrada foi de 210 HV0,5 para o metal de solda no passe de enchimento e a menor de 140 HV0,5 para o metal de base. Com relação a valores médios, para o passe de raiz, o metal de base apresentou dureza de  $149,3 \pm 3,2$  HV0,5, a ZAC de  $156,5 \pm 5,6$  HV0,5 e o metal de solda de  $193,1 \pm 9,4$  HV0,5 (em função do revenimento do passe de acabamento). Já para o passe de enchimento, o metal de base apresentou dureza de  $153,0 \pm 4,2$  HV0,5, a ZAC de  $165,7 \pm 10$  HV0,5 e o metal de solda de  $201,4 \pm 9,4$  HV0,5.

Dada a pequena dispersão entre as medidas, considera-se que não sejam necessárias medições no corpo de prova do Teste 16, pois, o comportamento é bastante similar para as amostras investigadas.

Neste sentido, todos estes valores são adequados e inferiores a 350 HV, estabelecido na API 1104 (2010) como risco para ocorrência de trinca a frio.

#### 5.3.3.8 Micrografias

Foram realizadas micrografias por meio de microscopia óptica em microscópio Olympus BX41M com aumento de 400 e 100 vezes nas soldas (corpos de prova do ensaio de dureza) realizadas pelo processo GMAW derivativo (STT). O Apêndice II apresenta as micrografias obtidas com aumento de 400 vezes e de 100 vezes. Cada micrografia está ligada ao ponto identificado nas curvas de dureza da Figura 134, uma vez que após cada indentação do penetrador fez-se uma foto.

As imagens apresentadas no Apêndice II traduzem uma microestrutura esperada, ou seja, se observa os microconstituintes normalmente presentes em aços carbono como grão de ferrita e perlita no contorno deste grão ferrítico para o metal de base. Para o metal de solda, uma estrutura ferrítica acicular mais grosseira. Já para a ZAC de granulação grosseira (ZAC-GG) tem-se uma estrutura preferencialmente ferrítica acicular grosseira (~30 micra) com componentes MA, sendo que a ZAC de granulação fina (ZAC-GF) apresenta grãos menores (~ 6 micra).

Uma vez tanto os ensaios de dureza quanto de tenacidade charpy não apresentaram problema de fragilidade, apenas limitou-se a uma breve análise das micrografias por microscopia óptica. Entretanto, caso seja necessárias maiores análises, poderia ser discutido o uso de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) ou mesmo EDS (Espectroscopia por Energia Dispersiva) para caracterização de microconstituintes/fases específicas. Destaca-se ainda que a análise da microestrutura não foi objeto de foco do presente trabalho.

### 5.3.4 Oscilogramas

Nas Figuras 135 a 140 seguintes são mostrados os oscilogramas do passe de raiz e enchimento para o Teste 17 na posição plana, vertical e sobrecabeça. Os outros oscilogramas relativos aos testes analisados por macrografia encontram-se no Apêndice IX.

Os oscilogramas estão de acordo com as formas de onda do processo derivativo (STT) para a transferência por curto-circuito em função do comportamento da gota nas três posições, conforme visto no Item 2.2.2.

Ainda com relação aos oscilogramas, observa-se a redução da frequência de curto-circuito durante a progressão descendente, que gera um ruído/som característico durante a soldagem, onde a frequência sonora vai diminuindo conforme a soldagem avança da posição 12 horas (plana) para a 18 horas (sobrecabeça). Este resultado é mais nítido para o passe de raiz e está de acordo com Scotti et al. (2013).

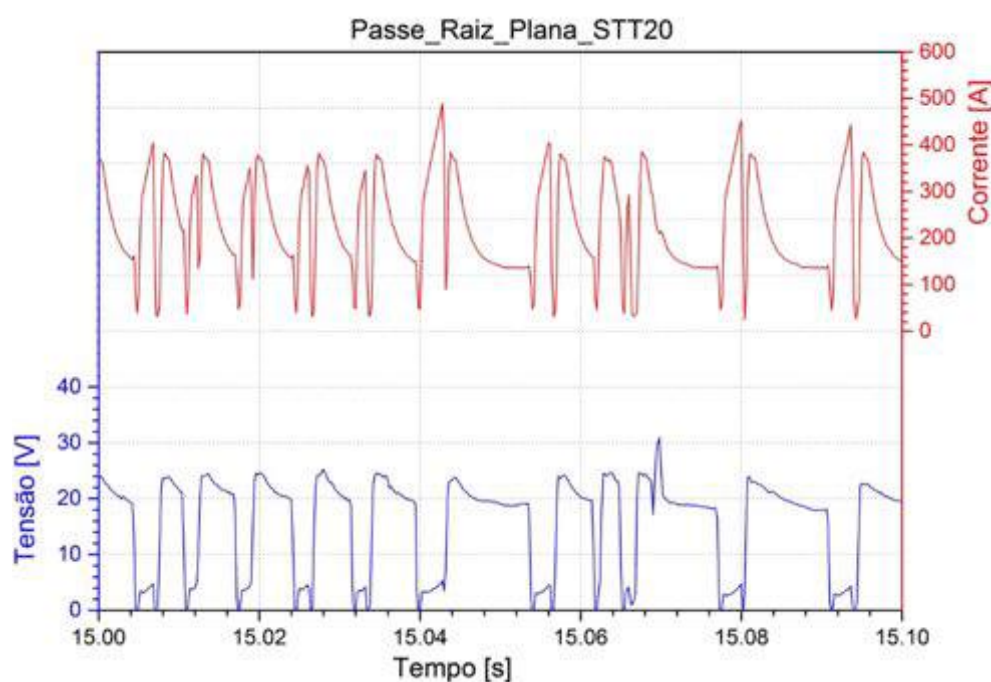


Figura 135. Oscilograma da posição plana em função do passe de raiz executado com o processo derivativo STT (teste 17)



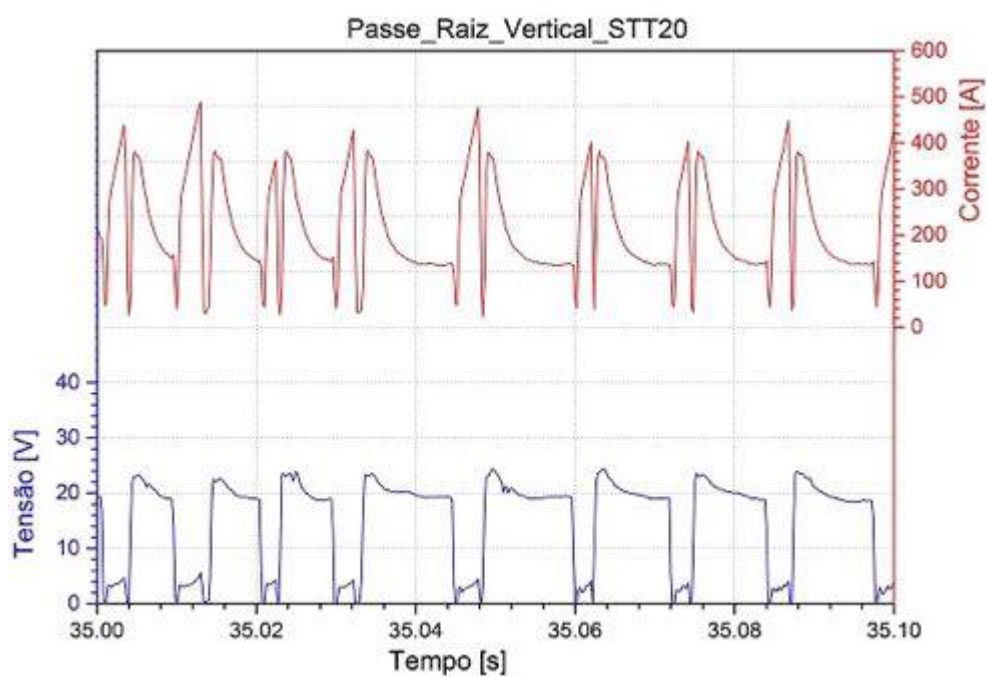


Figura 136. Oscilograma da posição vertical em função do passe de raiz executado com o processo derivativo STT (teste 17)

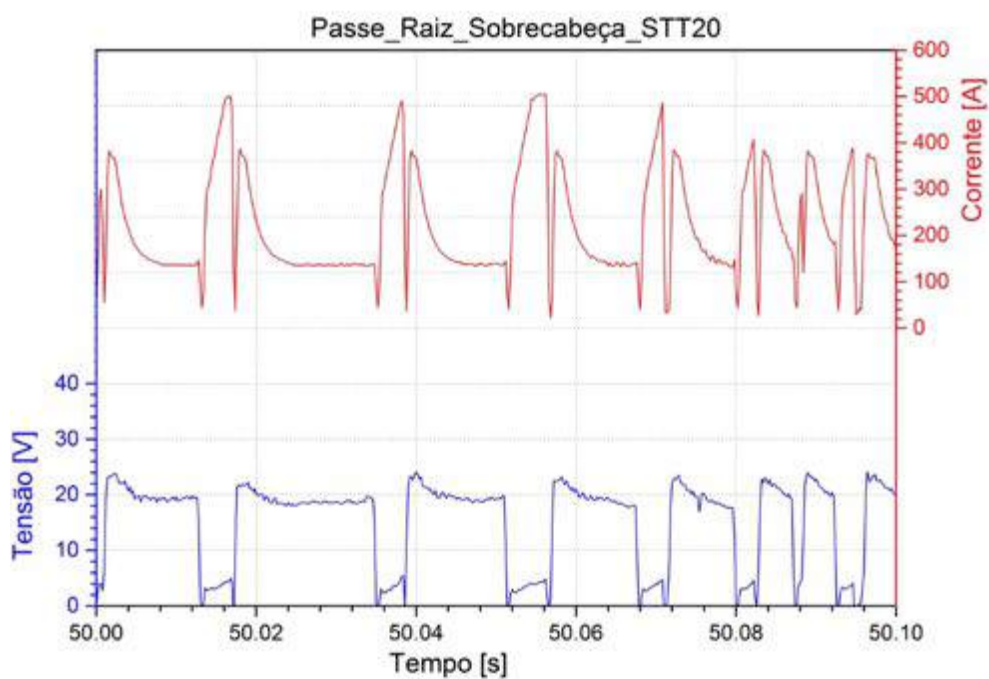


Figura 137. Oscilograma da posição sobrecabeça em função do passe de raiz executado com o processo derivativo STT (teste 17)

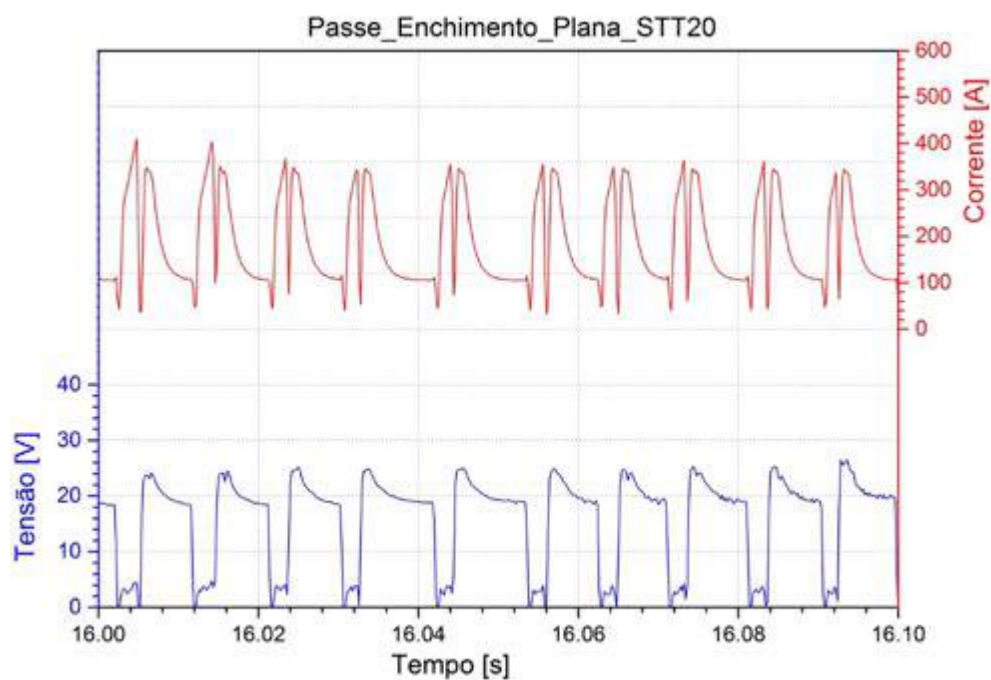


Figura 138. Oscilograma da posição plana em função do passe de enchimento executado com o processo derivativo STT (teste 17)

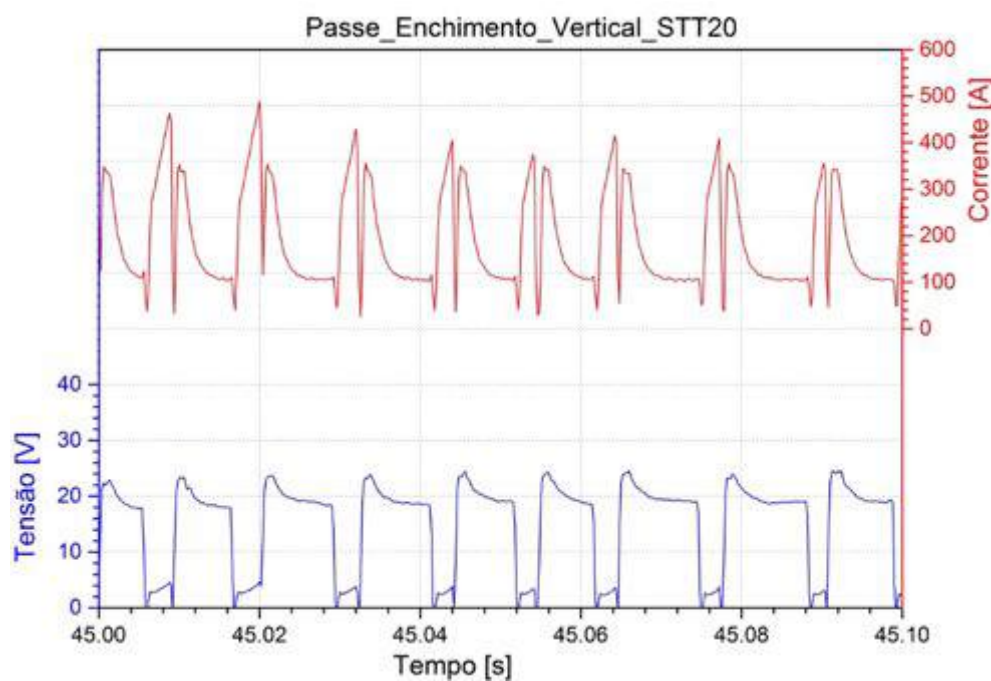


Figura 139. Oscilograma da posição vertical em função do passe de enchimento executado com o processo derivativo STT (teste 17)



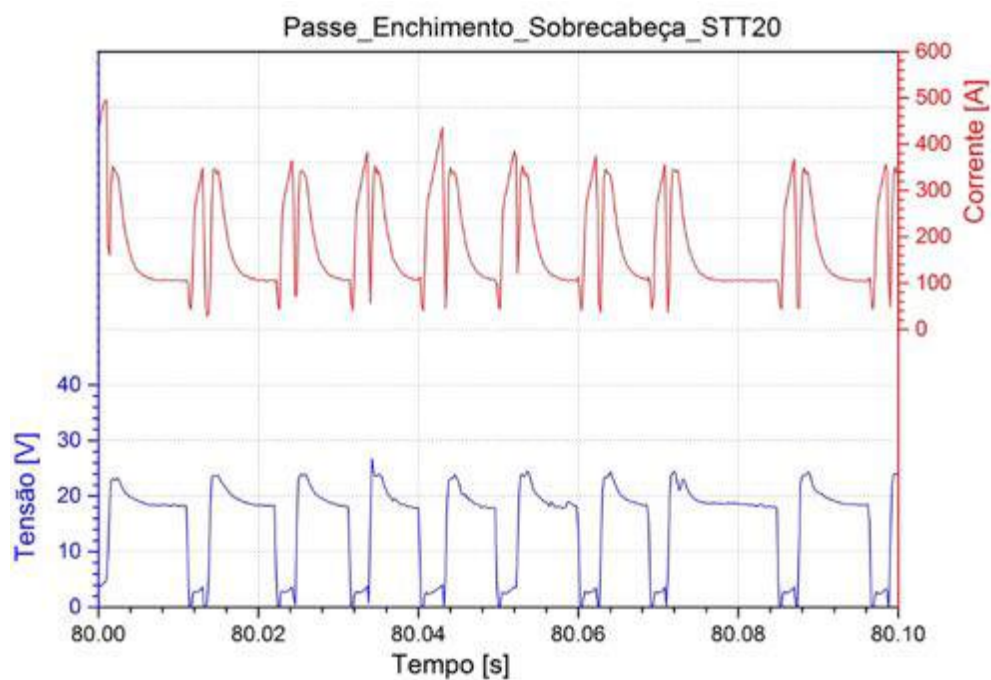


Figura 140. Oscilograma da posição sobrecabeça em função do passe de enchimento executado com o processo derivativo STT (teste 17)

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÕES

A partir dos objetivos propostos para se avaliar os processos GMAW com transferência por curto-circuito convencional e controlado (derivativo) com tecnologia STT para a união de dutos com 8" e chanfro estreito, com um único conjunto de parâmetros, é possível concluir que:

a) Com relação ao processo convencional

- A melhor condição de soldagem para o passe de raiz encontrada foi utilizando velocidade de alimentação 5 m/min, velocidade de soldagem 39,2 cm/min, tensão de 19V, indutância de 40%, DBCP de 18 mm, amplitude de tecimento em 3 mm, frequência de oscilação 4,1 Hz e ângulo de inclinação da tocha em 0°. Este conjunto de parâmetros se mostrou robusto e aplicável ao tipo de chanfro;
- As melhores condições de soldagem para o passe de enchimento/acabamento, embora as macrografias revelaram defeitos foi utilizando alimentação 3,5 m/min, velocidade de soldagem 16,5 cm/min, tensão de 17,0 V, indutância de 40%, DBCP de 12 mm, amplitude de tecimento em 4 mm, frequência de oscilação 1,7Hz, ângulo de inclinação da tocha em 0° e 15°;
- Embora o passe de raiz seja o mais difícil e crítico os resultados e testes demonstraram que para um único conjunto de parâmetros aplicados a chanfro estreito, a soldagem do passe de enchimento se tornou mais difícil de execução. Assim, destaca-se que não foi possível encontrar um parâmetro adequado para o passe de enchimento devido à grande ocorrência de escorrimentos, além de descontinuidades internas (porosidade, falta de fusão e etc.);
- Para o processo convencional, o aumento da DBCP na posição plana evita de perfurar a raiz. A DBCP mínima para que não ocorra a perfuração na raiz na posição plana é de 18,0 mm;
- Os cordões em geral apresentaram uma tendência maior ao escorrimento do metal fundido na posição vertical, o que contribuiu para o aparecimento de poros interno ao cordão de solda e o aumento da largura do cordão no passe de enchimento neste local;

- À medida que avança da posição vertical para a sobrecabeça, o reforço do passe de enchimento/acabamento aumenta;
- A maior limitação para imposição de maiores valores de velocidade de alimentação/corrente foi o escorrimento da poça na posição 15 horas (vertical descendente) e 18 horas (sobrecabeça descendente).

b) Com relação ao processo derivativo (STT)

- A melhor condição de soldagem encontrada para o passe de raiz foi utilizando-se velocidade de alimentação 5,75 m/min, velocidade de soldagem 35 cm/min, corrente de base 130 A, corrente de pico 350 A, Tout igual a 10, BurnBack Time igual a 0,03s, DBCP de 12 mm, amplitude de tecimento igual a 3 mm, frequência de oscilação igual a 3,6 Hz e ângulo de inclinação da tocha em 0°;
- Já a melhor condição de soldagem para o passe de acabamento/enchimento encontrada foi utilizando velocidade de alimentação 4,4 m/min, velocidade de soldagem 22,3 cm/min, corrente de base 100 A, corrente de pico 320 A, Tout igual a 8, BurnBack Time igual a 0,03s, DBCP de 12 mm, amplitude de tecimento igual a 4 mm, frequência de oscilação igual a 2,5 Hz e ângulo de inclinação da tocha em 15°;
- Dessa forma, somente com o processo derivativo investigado (STT) se conseguiu, com conjunto de parâmetros adequado e robusto, soldar chanfro estreito, quando observado os critérios de aceitabilidade da Norma API 1104 (2010), ou seja, foi possível obter passes de raiz e de enchimento sem defeitos;
- A diminuição da velocidade de soldagem, aumento da velocidade de alimentação e a inclinação da tocha em 15° afetou de forma significativa o aumento da penetração dos cordões no enchimento;
- Para o chanfro estudado, deve-se utilizar uma relação  $V_a/V_s$  igual 19,73 para evitar o escorrimento da poça de fusão;
- Para sanar a perfuração da raiz na posição plana adotou-se a boa prática de entortar a ponta do arame em 3 mm formando um ângulo de 90° antes de iniciar os testes;
- Os resultados mostram o uso de menores correntes para o passe de enchimento/acabamento, em relação ao passe de raiz, de forma a se evitar escorrimento na posição 15 horas e 18 horas.

c) Comparação entre o processo derivativo (STT) e o processo convencional

- Ao se comparar os resultados apresentados, nota-se que o processo convencional ( $V_s = 16,5 \text{ cm/min}$ ) atingiu menor velocidade de soldagem no passe de enchimento (26,0% menor) em relação ao processo derivativo – STT (22,3cm/min). Já para o passe de raiz o processo derivativo (35,0 cm/min) atingiu velocidade de soldagem 10,7% menor em relação ao processo convencional (39,2cm/min);
- O processo derivativo (STT) gera pouco respingo, para o conjunto de parâmetros selecionado, em relação ao processo convencional;
- No processo convencional e STT, menores níveis de velocidade de soldagem na posição vertical reduz o escorrimento da poça de fusão devido à compensação da força da gravidade pelas forças exercidas pelo gás e pela força de escavação da poça;
- Para a utilização da mesma velocidade de soldagem e alimentação, nota-se que o reforço fica maior à medida em que se caminha para a posição sobre cabeça, tanto para o processo convencional, quanto para o derivativo;
- A execução do passe de enchimento se torna mais difícil pelo processo convencional por causa do excesso de escorrimientos e por não haver o controle da corrente. Para conter o escorrimento neste caso, é necessário que a altura do passe de raiz seja a menor possível em todas as posições (facilita o escoamento de calor contido na poça de fusão, no passe de enchimento, devido ao aumento da área de contato entre a poça de fusão e a superfície da junta);
- Fica claro que para cada posição de soldagem é necessário variar os parâmetros de soldagem gerais (velocidade de soldagem, velocidade de alimentação, e etc.) e particulares de cada processo de soldagem dinamicamente, tanto para o passe de raiz como para o passe de enchimento.

d) Em relação à bancada e metodologia experimentais:

- O controle automático da DBCP se mostrou eficiente na execução do passe de raiz para os processos utilizados, sendo que a implementação do filtro digital no controle de ajuste da DBCP se mostrou eficiente e atendeu os requisitos da soldagem, melhorando o amortecimento do sistema e diminuiu a resolução de correção do eixo z para 1mm, o que antes seria de 2mm, possibilitando seu uso ao longo de toda meia cana;

- Os resultados dos pré-testes com filmagem termográfica mostraram que o decaimento de temperatura em um dos lados do duto não afeta a soldagem em geral;
- A técnica de planificação das fotos minimizou a quantidade de imagens (3 para 1 foto em cada cordão de solda), melhorou a apresentação dos resultados, facilitou a distinção de início e fim das posições de soldagem (plana, vertical e sobrecabeça) e a identificação geométrica visual da coloração ditada pelos óxidos ao redor da solda que é formada pelo aquecimento em ambos os lados do cordão de solda;
- Nos ensaios de enchimento, notou-se a importância da retirada do revestimento. Caso contrário, há a geração de porosidades e perda de qualidade da junta soldada.

## CAPÍTULO VII

### TRABALHOS FUTUROS

Com intuito de aprimorar os dados e informações obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho são propostas as seguintes sugestões para dar continuidade e contribuir para a aplicação de processos GMAW curto-circuito convencional e controlado (STT) na união de dutos.

- Avaliar envelopes operacionais para o processo GMAW por transferência por curto-circuito convencional e controlado na união de dutos de aços de maior resistência mecânica (API 5L X100, p.ex.) e em outros materiais (aços inoxidáveis, p.ex.);
- Realizar soldagens ascendentes em curto-circuito convencional e avaliar a possibilidade de aumento a penetração. Para esta pesquisa não foi possível, pois, o equipamento não consegue realizar soldagens ascendentes;
- Projetar e construir equipamento de soldagem orbital que seja possível variar automaticamente os parâmetros de soldagem de acordo com a posição da tocha ao longo da meia cana, sem que o operador interfira manualmente neste parâmetro. A partir desse sistema, realizar soldagens variando-se os parâmetros da fonte de soldagem e do equipamento orbital (velocidade de soldagem, tempo de parada lateral, frequência de tecimento entre outros), procurando aumentar a produtividade do processo;
- Projetar e montar um equipamento de soldagem orbital que seja possível realizar soldagens com paradas laterais suaves e realizar soldagens ascendentes e, dessa forma, avaliar e estabelecer tempos de paradas laterais ótimos para o processo curto-circuito convencional e controlado (STT) de forma a expandir o envelope operacional;
- Aprimorar o sistema eletrônico de ajuste da DBCP, desenvolvido neste trabalho, eliminando o auxílio da “fita crepe” e implementando um seguidor de junta de forma que controle o eixo “y” automaticamente;

- Avaliar a utilização de ensaios não-destrutivos de forma a minimizar o tempo de escolha dos corpos de prova que serão encaminhados para a realização da macrografia e posteriormente para os de ensaios destrutivos;
- Realizar soldagens em curto-circuito convencional e controlado utilizando técnicas de pré-aquecimento para avaliar as consequências benéficas e/ou maléficas no envelope operacional;
- Avaliar a produtividade e aspecto do cordão de solda em dutos para passe de raiz utilizando arame Metal Core executado na descendente e processo de soldagem derivativo com curto-circuito controlado;
- Avaliar a produtividade e aspecto do cordão de solda em tubos para o passe de enchimento executados na ascendente/descendente utilizando arame Metal Core, gases Ar+8-10%CO<sub>2</sub> e processo de soldagem pulsado;
- Avaliar a produtividade e aspecto do cordão de solda em tubos para o passe de raiz utilizando-se processo de soldagem GTAW e para o passe de enchimento processos relacionados ao GMAW;
- Projetar um sistema que acople uma câmera de alta velocidade no sistema orbital de forma que possibilite avaliar o comportamento dos fenômenos relativos ao arco, transferência metálica e poça fundida de forma sincronizada com a posição e sinais elétricos (tensão e corrente), correlacionando com defeitos como o escorrimento;
- Projetar um sistema que acople uma câmera (cinta, suporte e motor) e que possibilite girar uma câmera ao redor do tubo com velocidade controlada para filmagem do cordão de solda e com auxílio de um software planificar a imagem de forma a facilitar o registro da solda durante documentação. Estudar a possibilidade desse sistema aplicado ao ensaio não destrutivo por radiografia ou líquido penetrante;
- Avaliar a utilização por deflexão magnética como forma de compensar a força gravitacional para controlar a penetração nas posições verticais, sobrecabeça e transições e aumentar o envelope operacional ao impedir escorrimentos, ou seja, tornar a soldagem fora de posição semelhante a soldagem plana com o auxílio de uma força externa, produzida por meio do controle do campo eletromagnético, gerado por um ímã;
- Avaliar a utilização por deflexão magnética para realização do tecimento em soldagem orbital, ou seja, eliminar a movimentação do eixo “y” mecanicamente e defletir o arco com o auxílio de um ímã (controle do campo eletromagnético);
- Realizar uma análise de custos e qualidade para estabelecer os ganhos potenciais que o processo mecanizado possui sobre processos manuais;
- Executar todos os parâmetros sugeridos nesta dissertação em um robô robusto;



- Analisar quantitativamente por meio de termografia a interferência da massa (espessura da chapa) na ZAC;
- Avaliar envelopes operacionais para o processo GMAW por transferência por curto-circuito convencional e controlado na união de dutos de aços utilizando outros projetos de juntas.

## CAPÍTULO VIII

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 5410. **Instalações elétricas de baixa tensão** – Edição comentada, 2004, 218p.

ABM. **Mineroduto Do Sistema Minas-Rio Conta Com Mais De 133 Mil Toneladas De Aço E 44 Mil Tubos**. Disponível em: < <http://www.abmbrasil.com.br/news/materias/5970-mineroduto-do-sistema-minas-rio-counta-com-mais-de-133-mil-toneladas-de-aco-e-44-mil-tubos/> >. 8/Dez/2014. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. ACESSO EM 20/01/2015.

ACUÑA ET AL. **Evaluation of Conventional and Controlled Short-Circuit GMAW Processes for Root Pass in Pipe Welding**. IN: Rio Pipeline 2013. Rio de Janeiro.

ALLDATASHEET. **LM78XX (KA78XX, MC78XX) Fixed Voltage Regulator (Positive)**. Disponível em: < <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/105716/FAIRCHILD/LM7818.html> >. 1999. Acesso em: 18/01/2015.

\_\_\_\_\_. **MC78XX/LM78XX/MC78XXA 3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator**. Disponível em: < <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/82833/FAIRCHILD/LM7805.html> >. 2001. Acesso em: 18/01/2015.

\_\_\_\_\_. **Microchip – PIC16F87XA Data Sheet - 28/40/44 Enhanced Flash Microcontrollers**. Disponível em: < <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/82390/MICROCHIP/PIC16F877.html> >. 2003. Acesso em: 18/01/2015.

ANSI/AWS. D10.12 - **Recommended Practices and Procedures for Welding Low Carbon Steel Pipe**. 1989.

AMELOTI ET AL. **Termografia Aplicada na Análise Térmica de um Processo de Soldagem TIG**. In: Conem 2014, Uberlândia, MG.

ANP. **Produção de Petróleo Cresce 13,3% e a de Gás 16% em Novembro na Comparação com O Ano Passado.** Disponível em: <  
<http://www.anp.gov.br/?pg=73659&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1421719706633> >. 20/Jan/2015. Acesso em: 20/01/2015.

API 1104 (2010). **Welding of Pipelines and Related Facilities.** 2010, 70p.

API 5L. **Specification for Line Pipe.** 45th edition, 2012, 180p.

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

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

AWS. **Welding Handbook: Welding Process (vol II).** AWS, USA, 8th Edition, 1991, cap 4, 955 p. (ISBN 0-87171-354-3).

BELGO. **Manual Belgo.** Disponível em: <  
<http://www.belgobekaert.com.br/Produtos/Documents/Folder-Solda.pdf> >. 2013. Acesso em: 11 de jan. 2014.

BRACARENSE ET AL. **A SOLDAGEM GMAW (OU MIG-MAG).** <http://www.abs-soldagem.org.br/centraladm/docs/revistas/Ensino.pdf> . p16. IN: Revista da Soldagem. ACESSO EM 22/01/2015.

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

CALLISTER, ET AL. **Materials Science and Engineering na Introduction.** 8ª edição, 1000p.

COSTA, T. F. ET AL. **Avaliação de Processos MIG/MAG Curto-Circuito Convencional e Controlado para a Soldagem de Dutos de Aço Carbono em Passe Único.** Dez/2012. 13 p. IN. Revista soldagem e Inspeção.

COSTA, T. F. **Aplicação de Processos MAG Curto-Circuito Convencional e Controlado na Soldagem de Dutos de Aço ao Carbono,** 2011. 184p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia.

DERUNTZ, B. D. **Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer® Welding to Industry**. Journal of Industrial Technology, vol. 19, p 1 – 5, nov. 2003.

DUTRA, J.C. **Manual de Instruções MTE DIGITEC 450/600**. Disponível em: < [http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/manuais/digitec\\_manual\\_instrucoes\\_5ed\\_\(2002\).pdf](http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/manuais/digitec_manual_instrucoes_5ed_(2002).pdf) >. 03/2002 . p20.

\_\_\_\_\_. & Quites, A. M. & **Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico**. 1979. Florianópolis.

FLIR SYSTEM. **ThermoVision™ LabView® Toolkit. USER'S MANUAL, 2010**. Disponível em: < [http://support.flir.com/DocDownload/Assets/48/English/T559015\\$a506.pdf](http://support.flir.com/DocDownload/Assets/48/English/T559015$a506.pdf) >. Acesso em: 23 de dez. 2014.

\_\_\_\_\_. **ThermoVision™ SDK. VERSÃO 2.6 USER'S MANUAL, 2009**. Disponível em: < [http://support.flir.com/DocDownload/Assets/51/English/T559014\\$a372.pdf](http://support.flir.com/DocDownload/Assets/51/English/T559014$a372.pdf) >. Acesso em: 23 de dez. 2014.

FLUKE. **Multímetro digital** Fluke. Disponível em: < <http://www.fluke.com/fluke/brpt/Multimetros-Digitais/General-Purpose-Multimeters/Fluke-17B+.htm?PID=78682> >. 2014. Acesso em: 21 de dez. 2014.

FORTES, C. **Apostila de Soldagem MIG/MAG - ESAB** Disponível em: < [http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0\\_apostilasoldagemmig\\_mag\\_low.pdf](http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmig_mag_low.pdf) >. 68p. 25/Jan/2005. ACESSO EM 20/01/2015.

\_\_\_\_\_. **Arames Tubulares**. Apostila ESAB S/A, Contagem, p. 2 – f 40, 2004.

INFOSOLDA. **Ensaio Macrográfico**. Disponível em: < <http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos/219-ensaio-macrografico.html> >. Acesso em: 23 de dez. 2014.

\_\_\_\_\_. **Ensaio Mecânico: Dobramento**. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos/213-ensaio-mecanico-dobramento.html> >. Acesso em: 27 de dez. 2014.

ISO 15653:2010. **Metallic materials - Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds**. 2010, 41p.

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

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

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

LEUZE ELETRONICS. **Optical Laser distance sensor – ODSL 96.** Disponível em: <[http://www.industrialcontroles.com/downloads/6\\_manual%201.pdf](http://www.industrialcontroles.com/downloads/6_manual%201.pdf)>. 2011. Acesso em: 18/01/2015.

LINCOLN ELECTRIC. **Surface Tension Transfer® (STT®).** Disponível em: <<http://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/NX220.pdf.10/2005>> Acesso em: 21 Jan, 2015, 2005.

\_\_\_\_\_. **Technology gets to the root of pipe welding.** Disponível em <[www.lincolnelectric.com](http://www.lincolnelectric.com)>. Acesso em: 03 abril, 2014.

\_\_\_\_\_. **GMAW Welding Guide.** Disponível em: <[http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable\\_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-50/c4200.pdf](http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-50/c4200.pdf)>. Acesso em: 26 Jan, 2015a

\_\_\_\_\_. **Surface Tension Transfer (STT) Pipe Welding.** . Disponível em: <<http://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Pages/stt-pipe-welding-detail.aspx>>. Acesso em: 21 Jan, 2015b.

MACHADO, M. V. R. **Sistema Embarcado sem Fio para Monitoramento de Sinais Em Soldagem a arco Elétrico com Abordagem Tecnológica.** 2011. Universidade Federal de Uberlândia.

MACHADO, M. V. R. ET AL. **Topologia de Condicionamento de Sinais para Monitoramento de Processos de Soldagem a Arco.** Consolda 2011, 2011. Natal - RN.

\_\_\_\_\_. **Determinação do Índice de Regularidade da Transferência Metálica por Curto-Circuito Via Monitoramento Sonoro.** In: Cobef, 2013, Itatiaia, RJ.

MAGALHÃES, V. A. N. ET AL. **Avaliação do uso do Tecimento com Diferentes Técnicas Operatórias na Soldagem Mig/Mag,** 2014. In: Conem 2014, Uberlândia, MG.

MAGALHÃES, V. A. N. **Simulação Física Por Retificação Da Soldagem De Dutos Com Processo GMAW**, 2012. 151p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

MALVINO, A. P., 1997, "Eletrônica". 4ª edição, São Paulo: McGraw-Hill, 788p.

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.

MENESES L. Y. H. **Modelagem e Simulação da Transferência Metálica no Processo GMAW-S em soldagem orbital**. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS. 2013. UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA.

MICROCHIP. PIC16F877A 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers DATASHEET. Disponível em <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/82338/MICROCHIP/PIC16F877A.html>> Acesso em 21/12/2014.

MILLER, 2010. **PipePro Welding System – Root-Fill-Cap Welding**. Miller Welds Specification Sheets. Disponível em <[http://www.millerwelds.com/pdf/spec\\_sheets/PWS1-0.pdf](http://www.millerwelds.com/pdf/spec_sheets/PWS1-0.pdf)>. Acesso em: 03 abril, 2014.

AMADEI, B. **Mineroduto do Minas-Rio é o maior do mundo**. Disponível em: <<http://www.abmbrasil.com.br/news/materias/5970-mineroduto-do-sistema-minas-rio-conta-com-mais-de-133-mil-toneladas-de-aco-e-44-mil-tubos/>> IN: ABM NEWS. 18/ Dez/2014. ACESSO EM 20/01/2015.

MODENESI, P. J. **Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais**. Disponível em: <[http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/fisica\\_da\\_soldagem1.pdf](http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/fisica_da_soldagem1.pdf)>. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 2008. Acesso em 19/01/2015.

MOTA, C. P. **Sistema de Visão por Infravermelho Próximo para Monitoramento de Processos de Soldagem a Arco**. 2011. 137 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MPMENDES. **Filtros analógicos e digitais**. Disponível em <<http://mpmendes-electronica.blogspot.com.br/2009/05/filtros-digitais.html>>. Acesso em 21/12/2014.

MUSSOI, F. L. R. Fundamentos de Eletromagnetismo. Versão 3.3. Disponível em <[file:///C:/Users/Luiz\\_Lab/Downloads/Apostila Eletromagnetismo CEFETSC.pdf](file:///C:/Users/Luiz_Lab/Downloads/Apostila_Eletromagnetismo_CEFETSC.pdf)> 2007  
Acesso em 19/01/2015.

NORMA PETROBRAS N-464. Rev. J. **Construção, Montagem e Condicionamento de Duto Terrestre**. 05/2014, 84p.

NAKASHIMA, K. **Valor eficaz e médio**, 2013. Disponível em: <<http://www.elt09.unifei.edu.br/roteiroslab/rms.pdf>>. Universidade Federal de Itajubá. Acesso em 15/12/14.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Data Sheet NI USB-6008, NI USB-6009**. Disponível em <<http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-218>>. Acesso em: 15 dez 2014.

\_\_\_\_\_. **User Guide and specification NI USB-6008/6009**. Disponível em <<http://www.ni.com/pdf/manuals/371303m.pdf>>. Acesso em: 15 dez 2014.

OTEMPOBRASIL. **Entenda o leilão de Libra, o maior campo de petróleo do Brasil**. Disponível em: < <http://www.otempo.com.br/capa/brasil/entenda-o-leil%C3%A3o-de-libra-o-maior-campo-de-petr%C3%B3leo-do-brasil-1.734163>>. 2013. Acesso em 19/01/2015.

PETROBRAS. **Esclarecimento sobre a Refinaria Abreu e Lima**. Disponível em: < <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/esclarecimento-sobre-a-refinaria-abreu-e-lima.htm>>. Acesso em 04/Jan/2015.

PEREIRA, A. S. ET. AL. **Avaliação da perfuração na soldagem em operação pelo processo MIG/MAG de dutos de alta resistência e baixa espessura.**, 2013. Revista Soldagem&Inseção. Acesso em: 21 de fev. 2014.

PETRONOTÍCIAS. **Pré-sal vai Exigir Tecnologias Inovadoras para Construção de Novas Linhas De Dutos**. Disponível em: <<http://www.petronoticias.com.br/archives/43053>>. 2013. Acesso em 19/Jan/2015.

PONOMAREV, ET AL. **A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding**. 30 January 2012. Journal of Materials Processing Technology.

ROSSI, ET AL. **Soldagem de Dutos com Diâmetro nominal de 2<sup>1/2</sup>” em aço carbono pelo processo STT (SURFACE TENSION TRANSFER)**. Abr/2011. IN: COBEF, Caxias do Sul, RS.



ROSADO, T. M. V. **Inovação do processo MIG/MAG – Análise de Produtividade e Emissão de Fumos**. 2008. 81p . Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa.

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

SCOTTI, A. ET AL. **Estudo da Soldagem de Dutos pelo Processo GMAW Utilizando Fontes Comerciais com Corrente Pulsada e Controle de Curto-Circuito: Resumo Executivo e Relatório Técnico**, 2013, 33 p.

SOUZA, ET. AL. **Influência da Regulagem de Parâmetros de Soldagem sobre a Estabilidade do Processo MIG/MAG Operando em Curto-Circuito**. Disponível em: <[http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/revistas/full/full\\_16\\_01\\_316.pdf](http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/revistas/full/full_16_01_316.pdf)>. 2011. IN: Consolda 2009. São Paulo/SP.

SOUZA, M. T. R. **Transporte Dutoviário: A Circulação de Combustíveis em São Paulo (1990 – 2000)**. Disponível em: < <http://www.ig.ufu.br/revista/caminhos.html>>. 2005. CAMINHOS DE GEOGRAFIA - Revista on line (ISSN 1678-6343).

STAVA, E. K. Waveform Control Speeds Root Pass. **Welding Design & Fabrication**, vol. 74, n° 2, p. 39 – 40, 2001.

TAKANO, E. H, ET AL. **Avaliação dos Parâmetros de Processamento por PTA nas Superfícies Processadas**. 2008. IN: Revista Soldagem e Inspeção.

TWI. **How do charpy values determined using sub-size specimens relate to results from full-size specimens?** Disponível em: < <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/structural-integrity-faqs/faq-how-do-charpy-values-determined-using-sub-size-specimens-relate-to-results-from-full-size-specimens/>>. The Welding Institute. Acesso em: 10 de fev. 2014.

UFSC. **Manual de Utilização TARTÍLOPE V4**. Florianópolis - SC, versão 1.02-2010. Disponível em: < [http://www.sps-soldagem.com.br/manuais/Manual\\_Tartilope\\_V4%201.02-2010.pdf](http://www.sps-soldagem.com.br/manuais/Manual_Tartilope_V4%201.02-2010.pdf) >. Acesso em: 10 de dezembro de 2014, 2010.

VARGAS, ET AL. **Parametrização do Passe de Raiz nas Posições Plana, Vertical descendente e Sobre-cabeça em Chanfro Estreito com o Processo STT**. abril/2011. IN: COBEF, Caxias do Sul, RS. 9p.

VARGAS, ET AL. **Método Prático para Determinar a Espessura do Nariz na Soldagem a Topo em Chanfro Estreito e sem Cobre-Junta**. Out/2011. IN: CONSOLDA, Natal, RN. 8p.

VARGAS, ET AL. **Determinação da Espessura do Nariz para Soldagem a Topo sem Abertura de Raiz e sem Cobre-Junta com Processos por Curto-Circuito derivativo STT e RMD**. Agosto/2014. IN: CONEM, Uberlândia, MG, Brasil. p9.

EDWARD, ET AL. **A riqueza que viaja pelo cano**. Disponível em: <[http://veja.abril.com.br/261207/p\\_066.shtml](http://veja.abril.com.br/261207/p_066.shtml)>. 26/Dez/2007. Acesso em 20, 01/2015. IN: REVISTA VEJA.

VILARINHO, ET AL. **Conventional and Controlled Short-Circuit GMAW Processes for Downhill Pipe Welding**. Nov/2014. IN: FABTECH SHOW, GEORGIA WORD CONGRESS CENTER ATLANTA, GEORGIA.

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

VILARINHO, ET AL. **The Use of Derivative GMAW Processes for Root Pass in Pipe Welding**. Nov/2013. IN: COBEM. Ribeirão Preto, SP, Brazil.

# APÊNDICE I

## Programa: Controle Automático Distância Bico Contato Peça (DBCP)

### Programação do Microcontrolador PIC (16F877A)

```
#include <16F877A.h>
#device adc=10
#use delay(clock=4000000)
#fuses XT, PUT, NOWDT, NOBROWNOUT, NOLVP

float tensao_ref=0, tensao_lida=0, tensao_media=0, tensao_ref_max = 0, tensao_ref_min = 0;
float tensao_ant, tensao_antant, y_ant = 0, y_antant = 0;
float histerese = 0.08;
int i=0, flag;

#int_RTCC

void RTCC_isr(void)
{
    tensao_lida = read_adc()/1023.0*5.0; //AD de 10 bits
    // filtro digital butterworth de segunda ordem em 400 Hz
    tensao_media =0.0201*tensao_lida+ 0.0492*tensao_ant+0.0201*tensao_antant +
    1.561*y_ant - 0.64148*y_antant;
    tensao_antant = tensao_ant;
    tensao_ant = tensao_lida;
    y_antant = y_ant;
    y_ant = tensao_media;
}

void main(void)
{
    setup_adc_ports(AN0);
    setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_2);
    setup_psp(PSP_DISABLED);
    setup_spi(SPI_SS_DISABLED);
    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_1);
    setup_timer_1(T1_DISABLED);
    setup_timer_2(T2_DISABLED,0,1);
    setup_comparator(NC_NC_NC_NC);
    setup_vref(FALSE);
    enable_interrupts(INT_RTCC);
    enable_interrupts(GLOBAL);

    set_adc_channel(0);
```

```

tensao_ant =0;
tensao_antant = 0;
y_ant = 0;
y_antant = 0;
while( true ) //Loop infinito.
{

flag=1;
while (!input(PIN_A1)) { //botão para pressionar e amostrar a tensão de ref.

output_low(PIN_D0);
output_low(PIN_D1);

if (flag==1){
tensao_ref = read_adc()/1023.0*5.0;
flag=0;
}
}

tensao_ref_max = tensao_ref + histerese;
tensao_ref_min = tensao_ref - histerese;

if(tensao_media>tensao_ref_max)
output_high(PIN_D0);
else
output_low(PIN_D0);

if(tensao_media<tensao_ref_min)
output_high(PIN_D1);
else
output_low(PIN_D1);

}
}

```

## APÊNDICE II

### Micrografia Óptica: Pontos de Coleta dos Dados de Dureza (STT)

Aumento da lente: 400 vezes

Tabela 2.1 – Micrografia óptica da posição plana correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 400 vezes

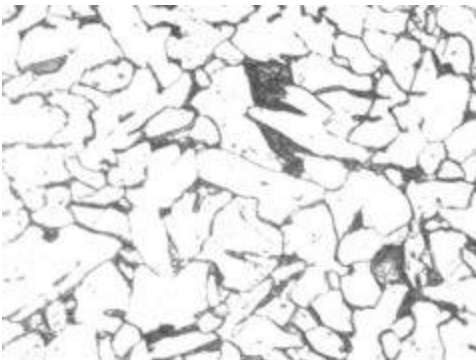
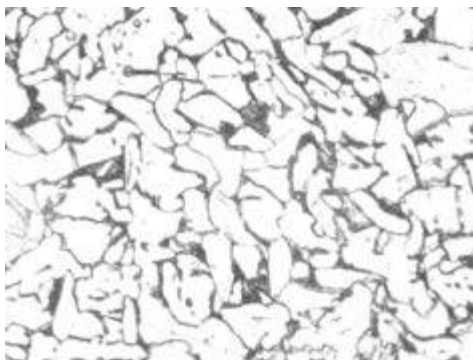
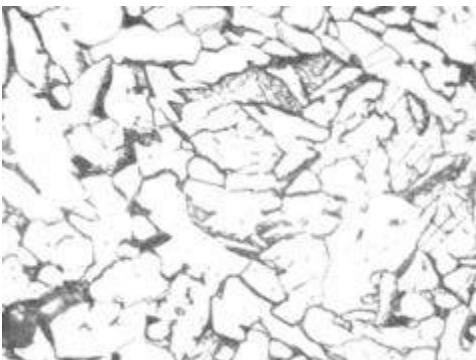
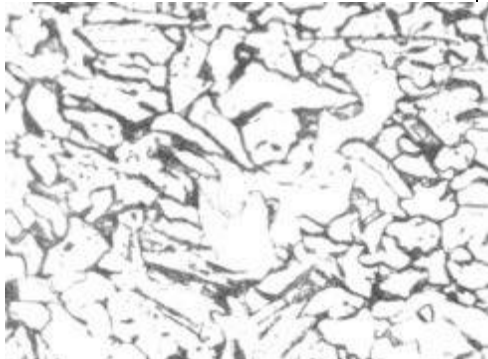
Pontos	Nível da Raiz	Nível do Enchimento
1		
2		

Tabela 2.1 – Micrografia óptica da posição plana correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 400 vezes (continuação)


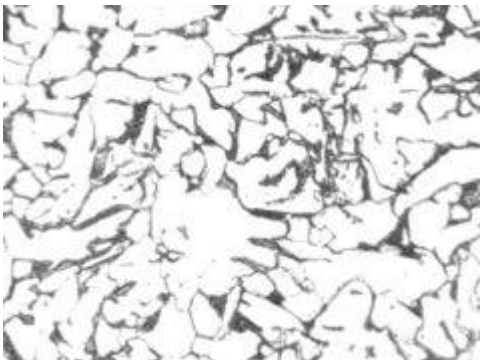




3		
4		
5		



Tabela 2.1 – Micrografia óptica da posição plana correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 400 vezes (continuação)

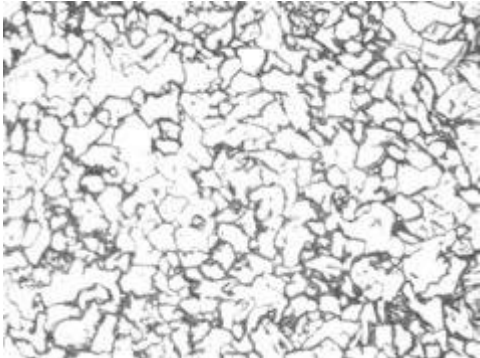
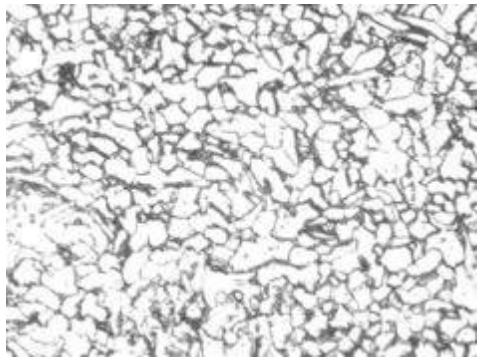

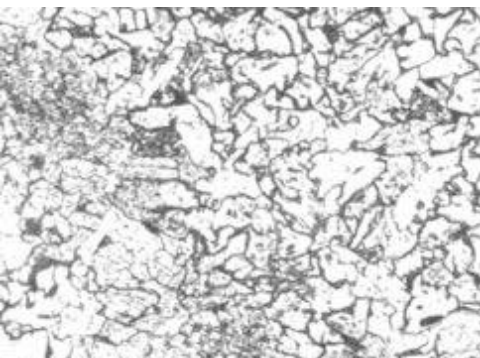
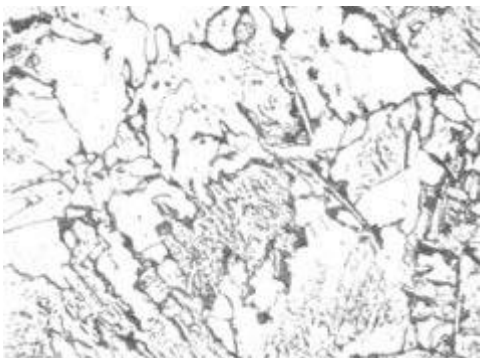
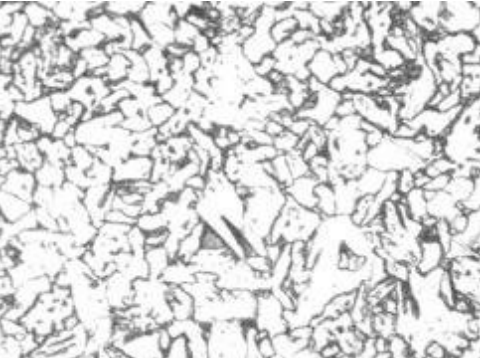
6		
7		
8		



Tabela 2.1 – Micrografia óptica da posição plana correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 400 vezes (continuação)

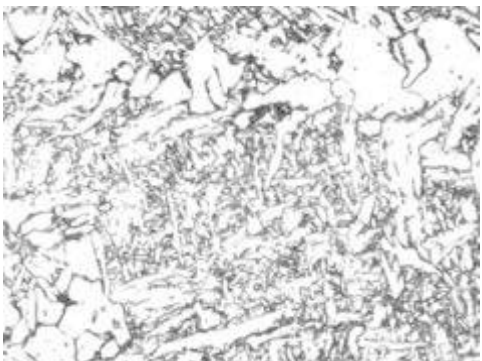
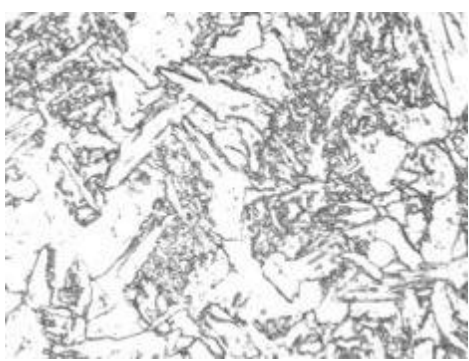
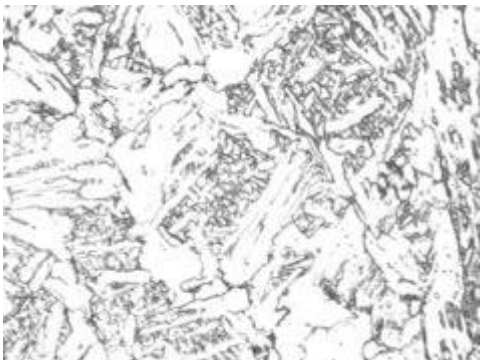
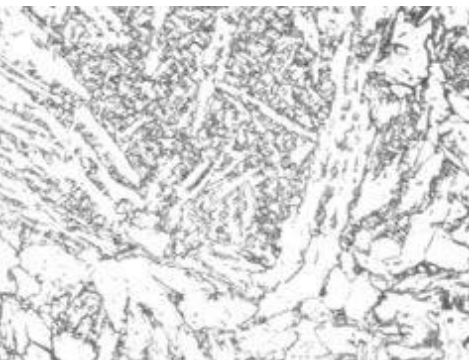
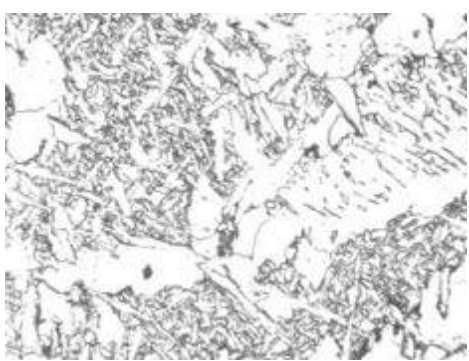

9		
10		
11		

Tabela 2.2 – Micrografia óptica da posição descendente/vertical correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 400 vezes

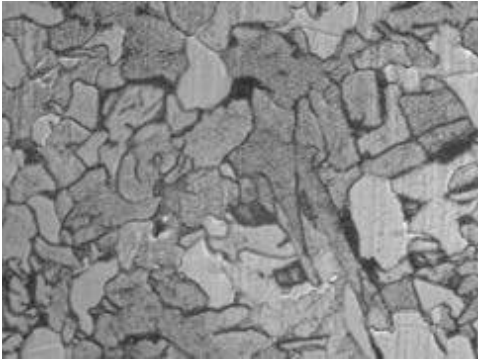
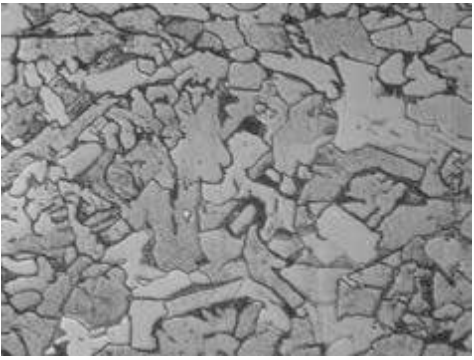
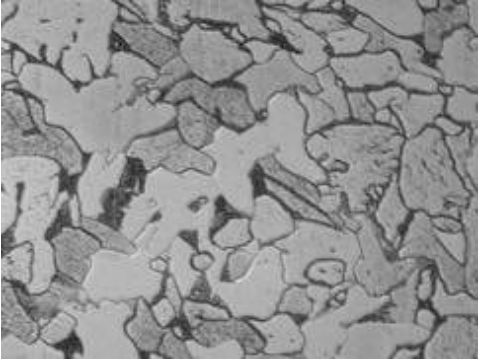
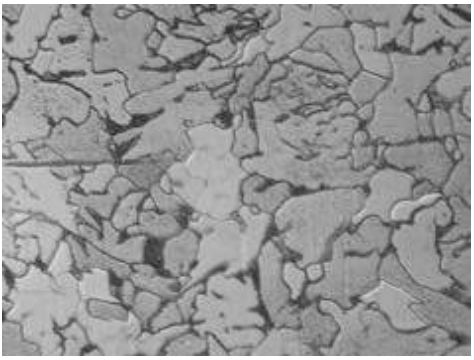
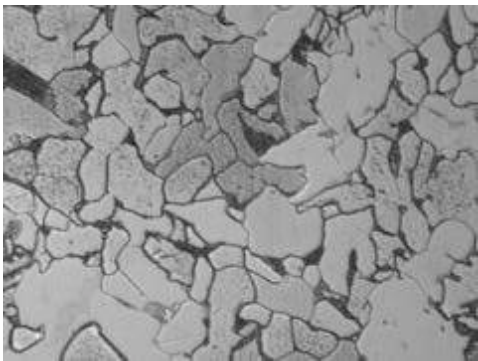
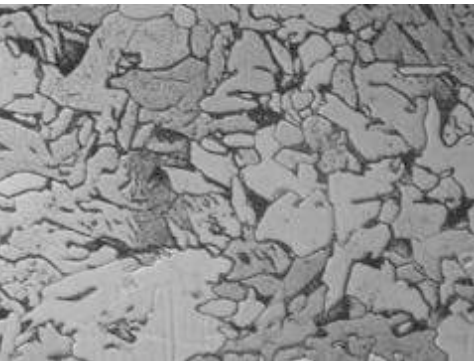
Pontos	Nível da Raiz	Nível do Enchimento
1		
2		
3		

Tabela 2.2 – Micrografia óptica da posição descendente/vertical correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 400 vezes (continuação)

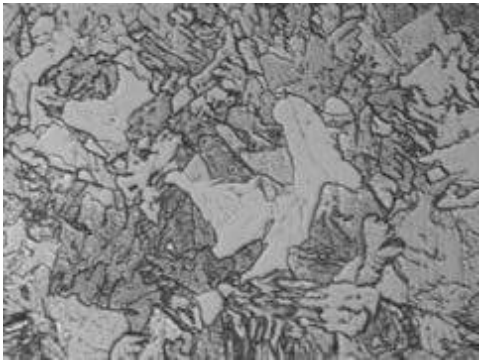
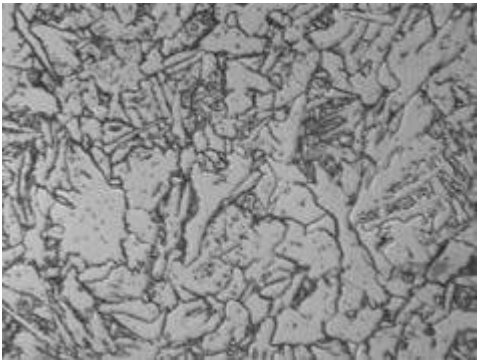
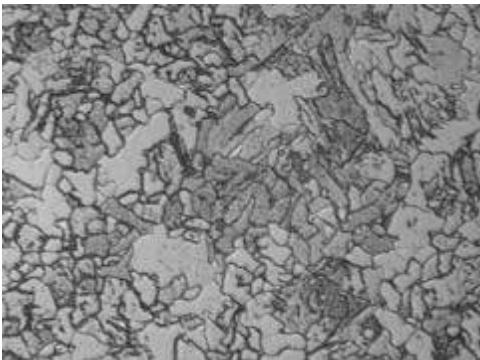
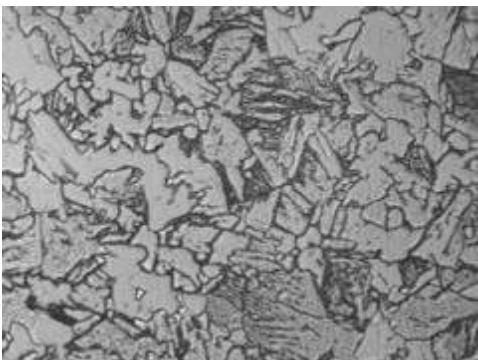
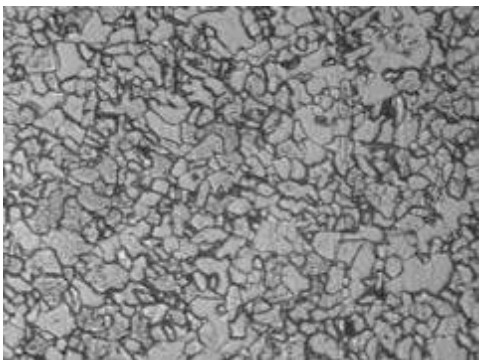
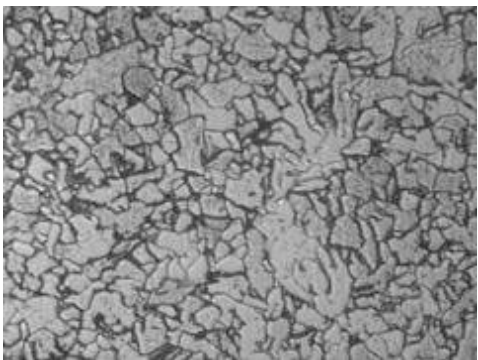
4		
5		
6		



Tabela 2.2 – Micrografia óptica da posição descendente/vertical correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 400 vezes (continuação)


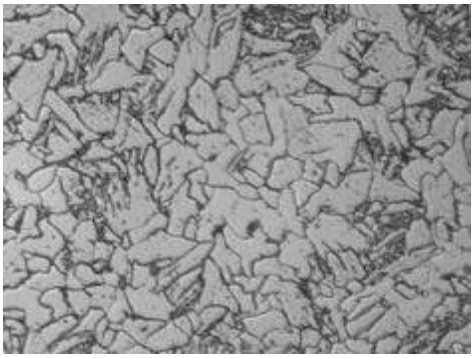
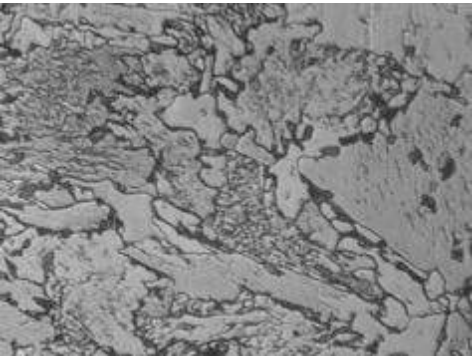
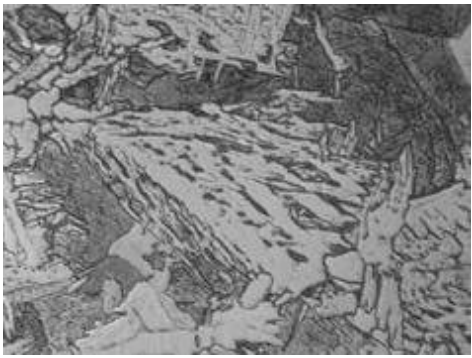
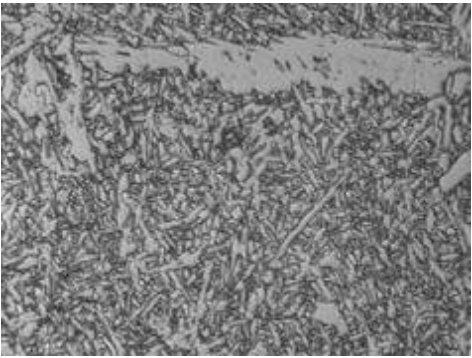
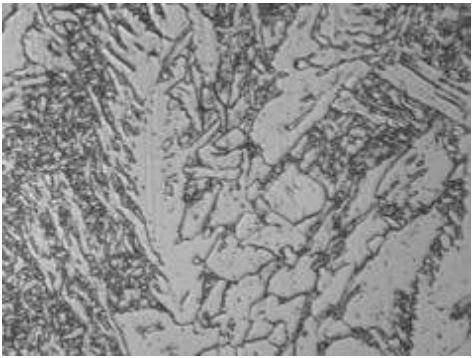
7		
8		
9		

Tabela 2.2 – Micrografia óptica da posição descendente/vertical correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 400 vezes (continuação)

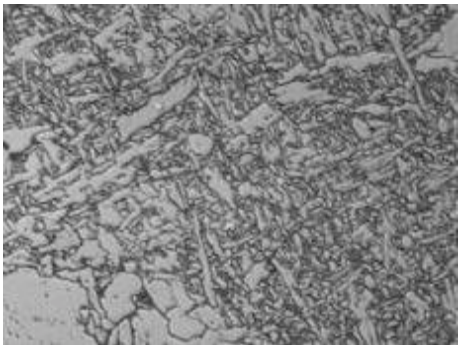
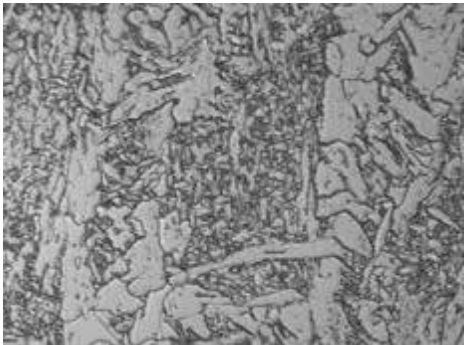
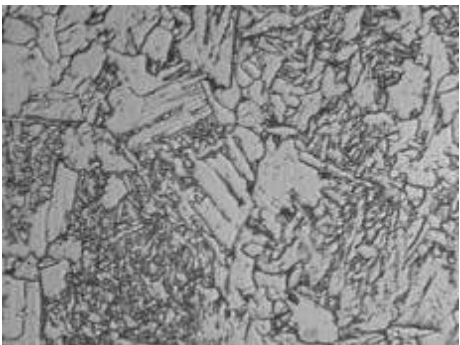
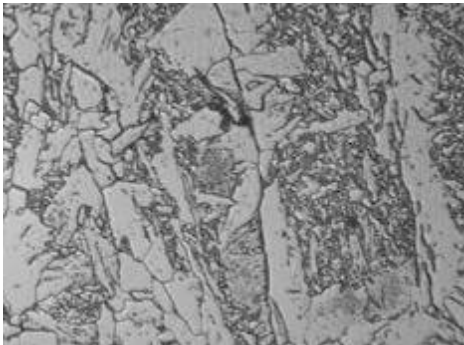
10		
11		

Tabela 2.3 – Micrografia óptica da posição sobrecabeça correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 400 vezes

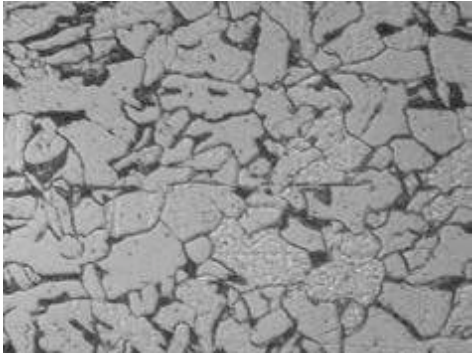
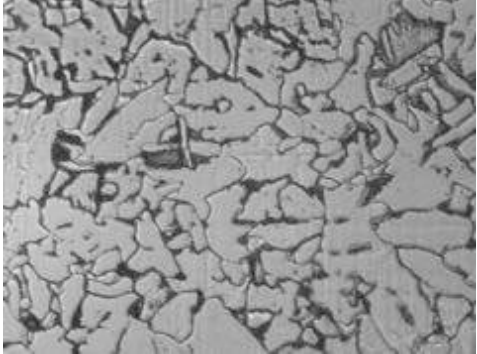
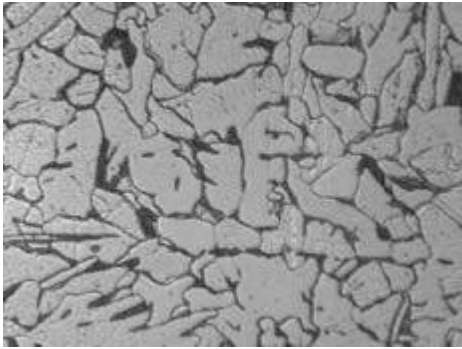
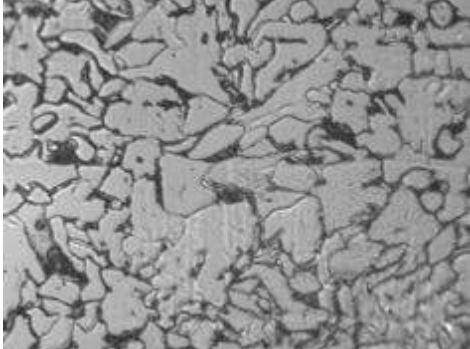
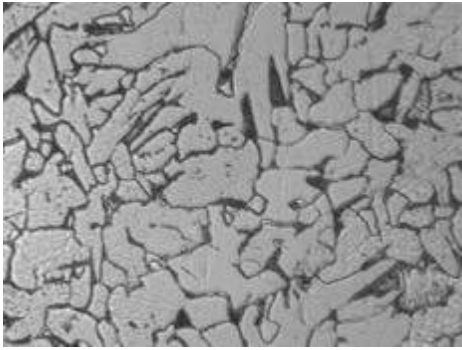
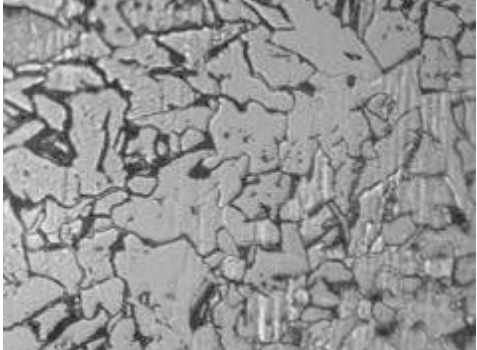
Pontos	Nível na Raiz	Nível do Enchimento
1		
2		
3		



Tabela 2.3 – Micrografia óptica da posição sobrecabeça correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 400 vezes (continuação)

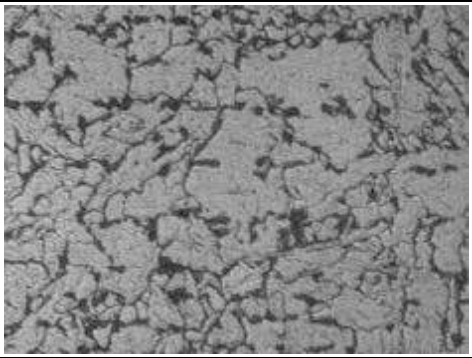
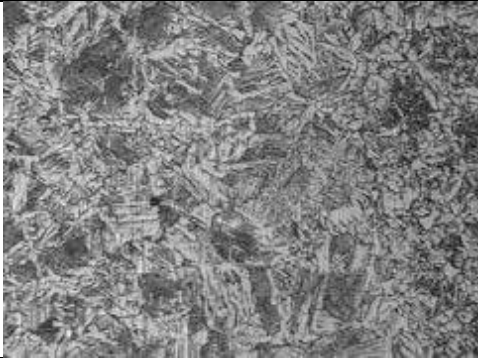
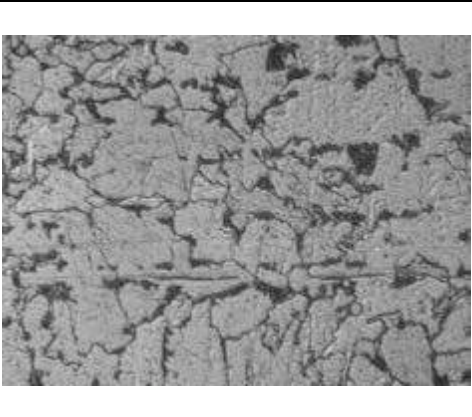

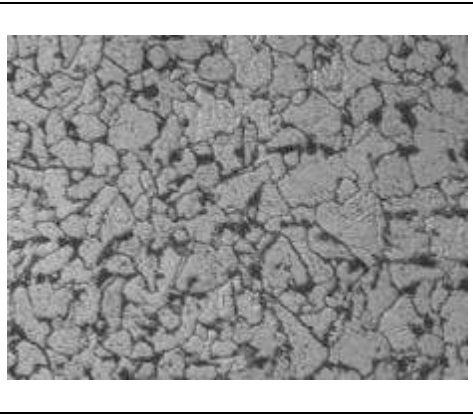
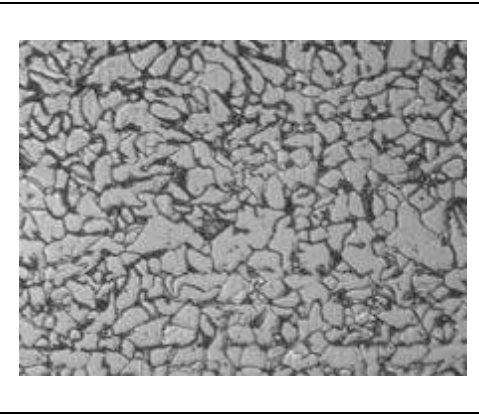
4		
5		
6		



Tabela 2.3 – Micrografia óptica da posição sobrecabeça correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 400 vezes (continuação)

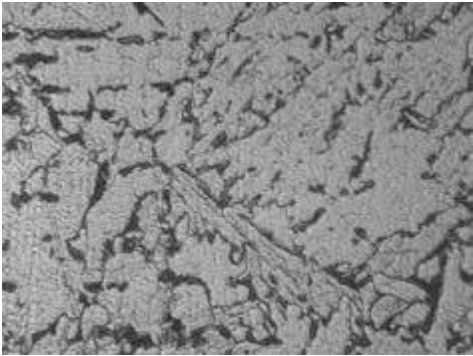
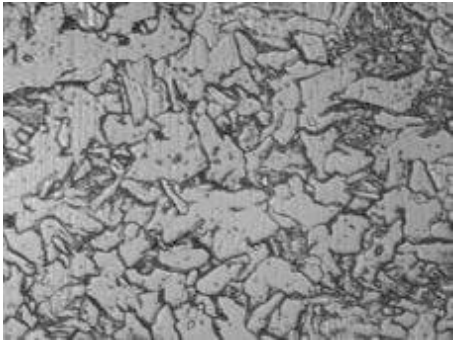
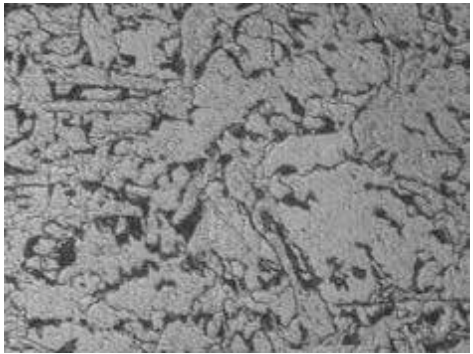

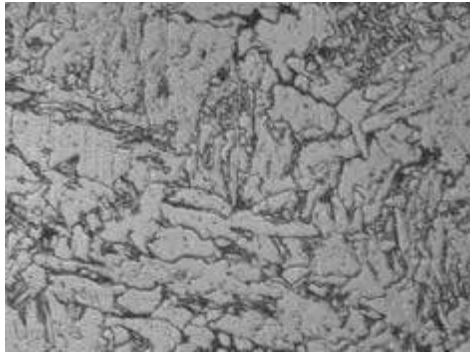
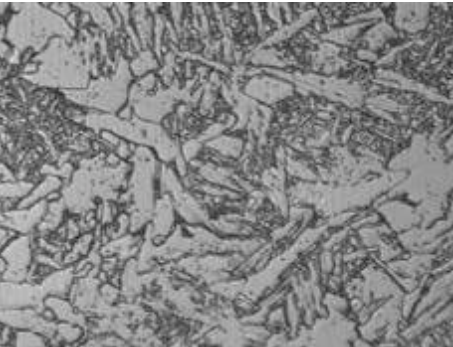
7		
8		
9		

Tabela 2.3 – Micrografia óptica da posição sobrecabeça correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 400 vezes (continuação)

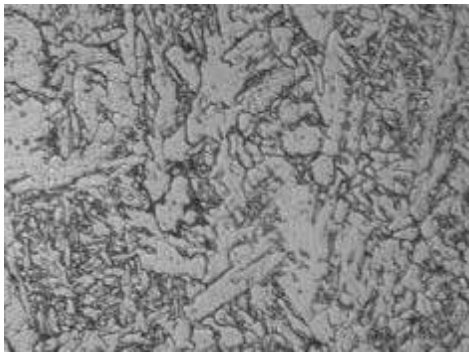
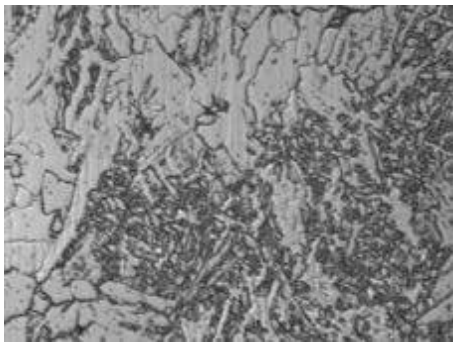
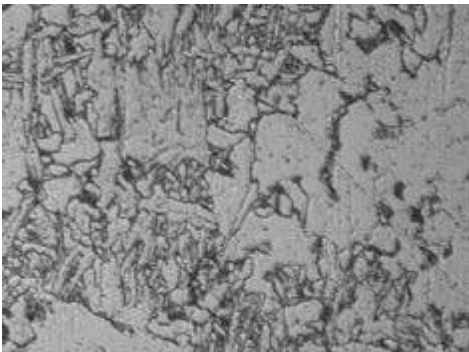
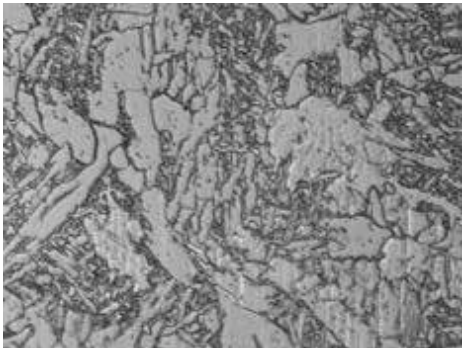
10		
11		

Tabela 2.4 – Micrografia óptica da posição plana correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 100 vezes

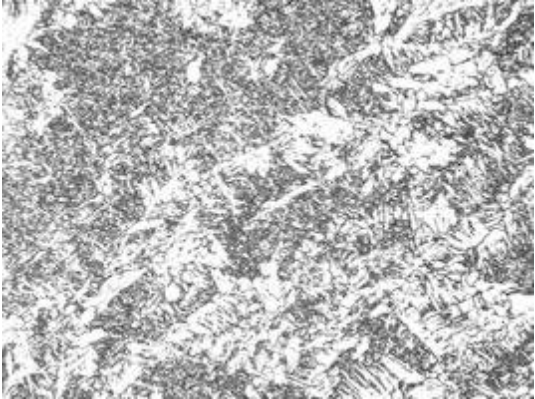
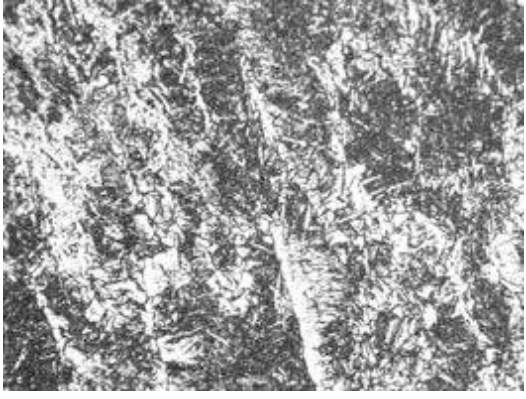
PLANA	
	
(a) ZF (raiz)	(b) ZF (enchimento)



Tabela 2.4 – Micrografia óptica da posição plana correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 100 vezes (continuação)

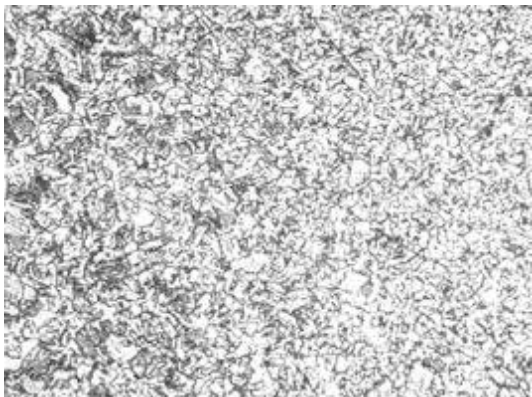
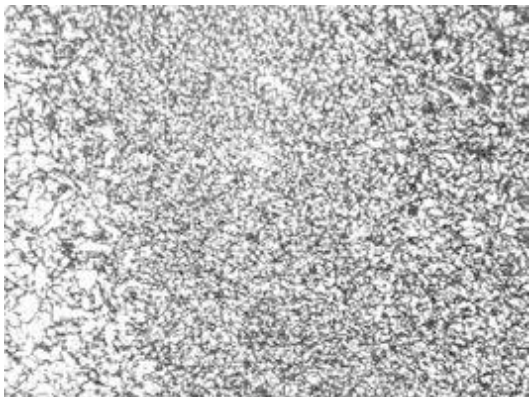
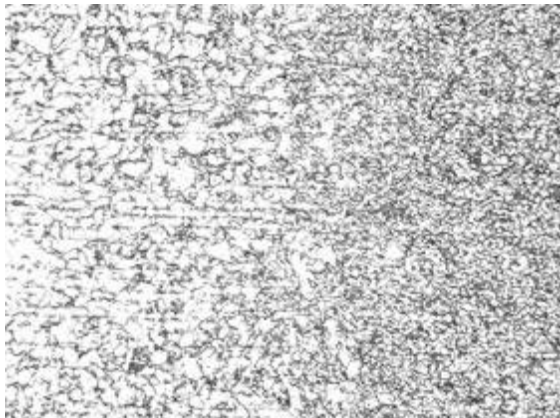
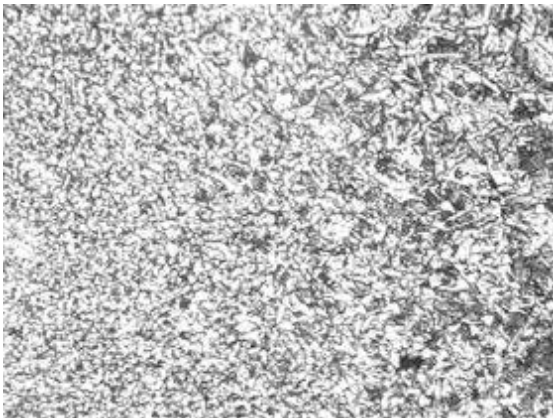
	
(c) Interface entre ZAC-GF e ZAC-GG (raiz)	(d) Interface entre MB ZAC-GF e ZAC-GG (enchimento)
	
(e) Interface entre MB e ZAC-GF (raiz)	(f) Interface entre ZAC-GF e ZAC-GG (enchimento)

Tabela 2.4 – Micrografia óptica da posição plana correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 100 vezes (continuação)

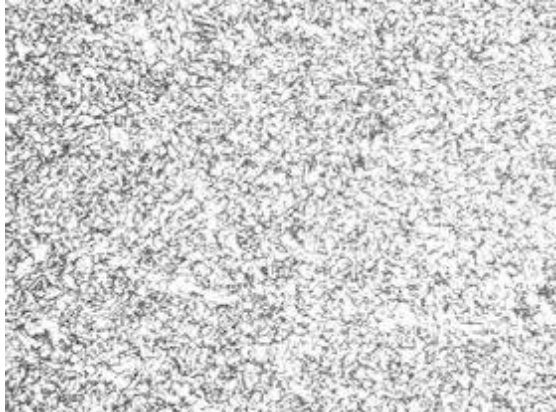
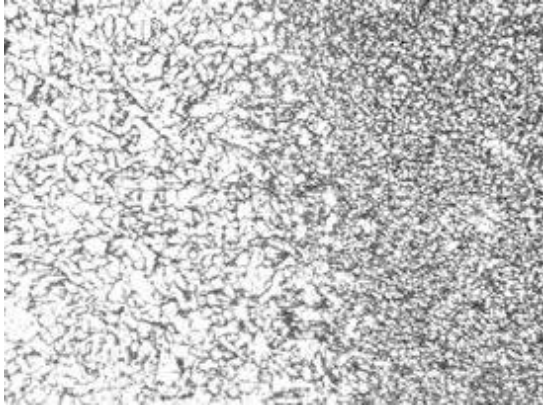
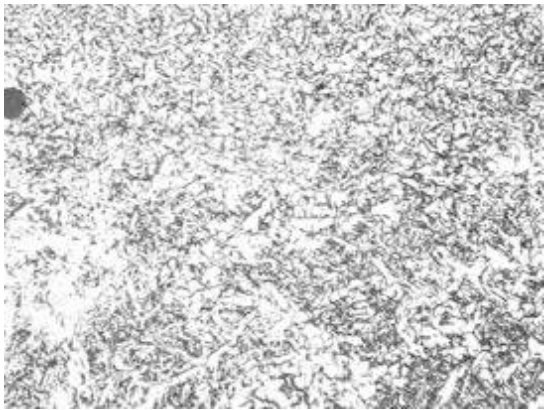
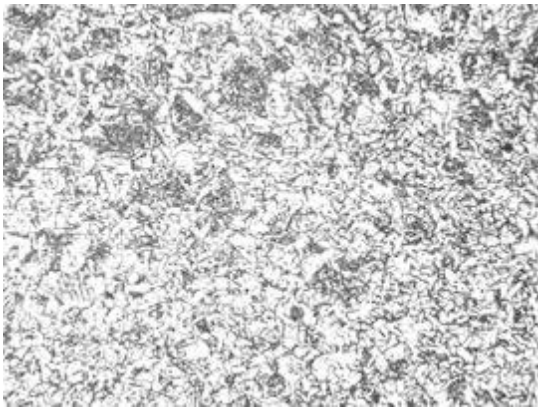
	
(g) Interface entre enchimento e raiz	(h) Interface entre MB ZAC-GF e ZAC-GG (enchimento)
	
(i) Interface entre centro do cordão e ZF (raiz)	(j) Interface entre centro do cordão e ZF (enchimento)

Tabela 2.4 – Micrografia óptica da posição plana correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 100 vezes (continuação)

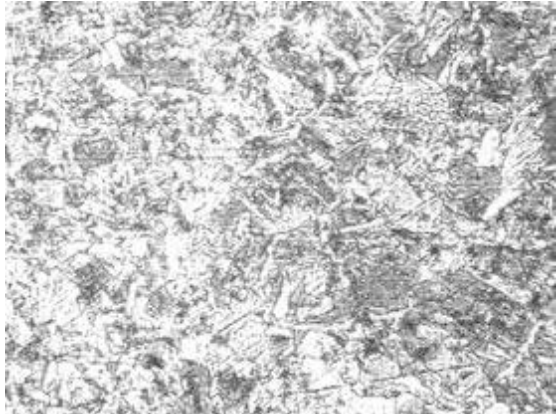

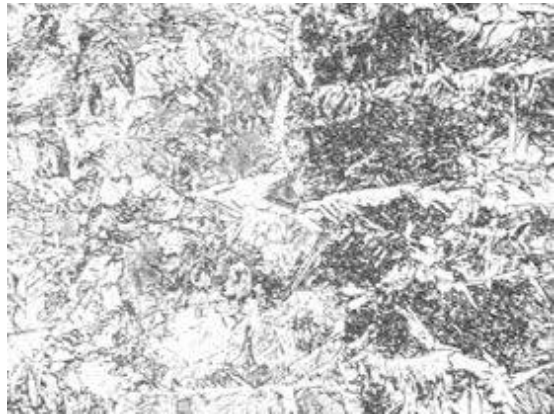
	
(k) ZAC-GG (raiz)	(l) ZAC-GG (enchimento)
	
(m) Interface entre ZAC-GG e ZF (raiz)	



Tabela 2.5 – Micrografia óptica da posição descendente/vertical correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 100 vezes

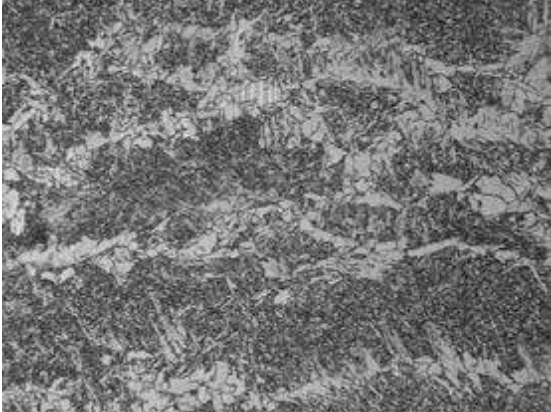
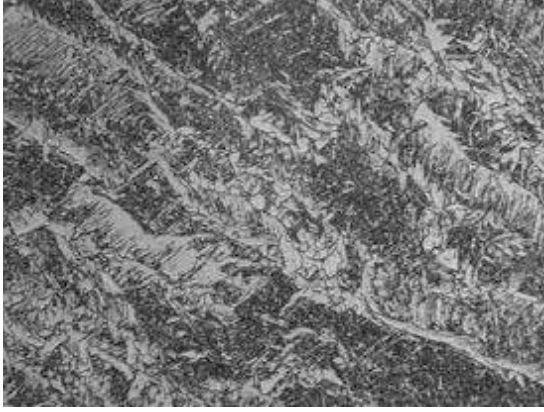
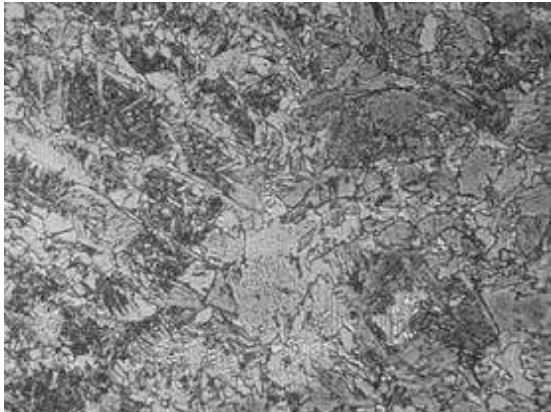
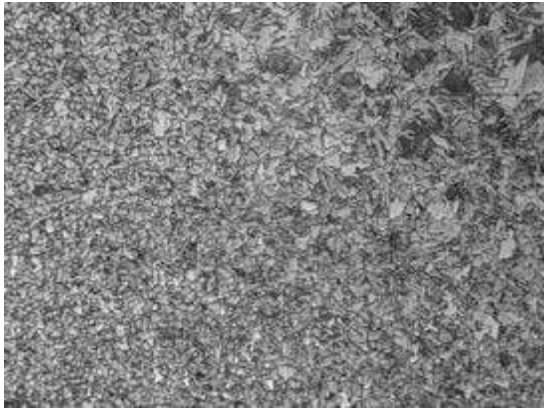
DESCENDENTE/VERTICAL	
	
(a) ZF (raiz)	(b) ZF (enchimento)
	
(c) Interface entre ZF e ZAC-GG (raiz)	(d) Interface entre ZAC-GF e ZAC-GG (enchimento)



Tabela 2.5 – Micrografia óptica da posição descendente/vertical correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 100 vezes (continuação)

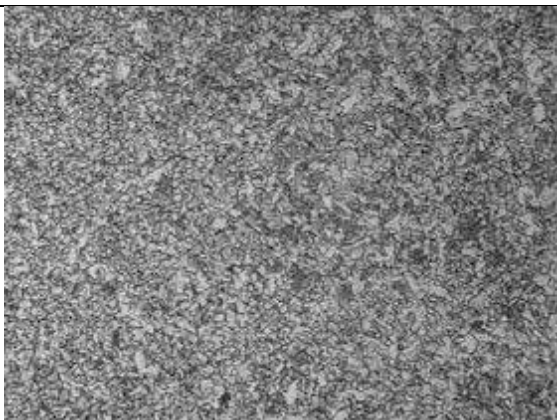
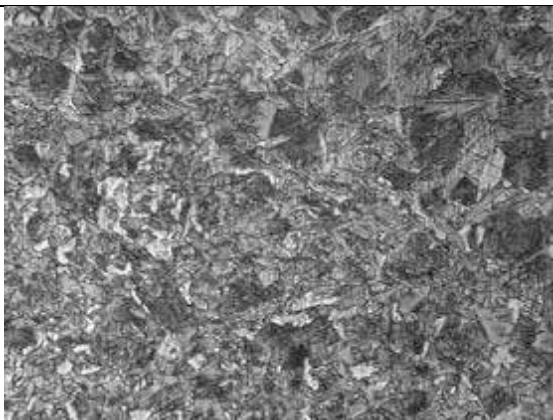
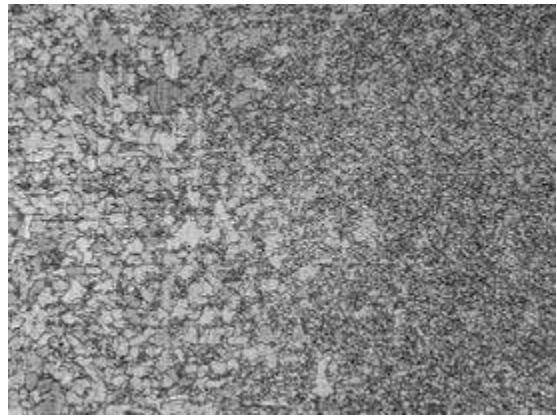
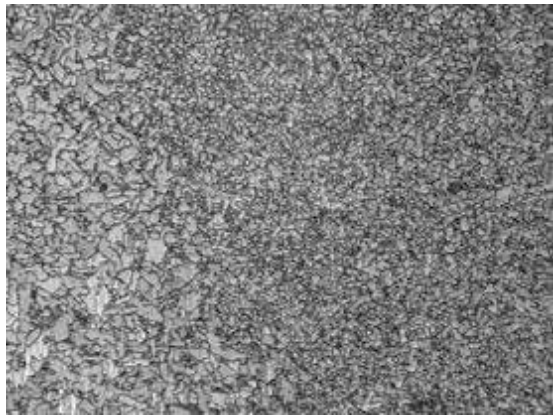
	
(e) Interface entre ZAC-GG e ZAC-GF (raiz)	(f) Interface entre ZAC-GG e ZF (enchimento)
	
(g) Interface MB e ZAC-GF (raiz)	(h) Interface entre MB e ZAC-GF (enchimento)

Tabela 2.5 – Micrografia óptica da posição descendente/vertical correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 100 vezes (continuação)


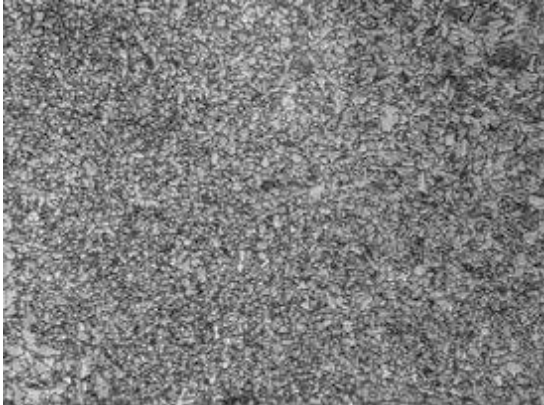
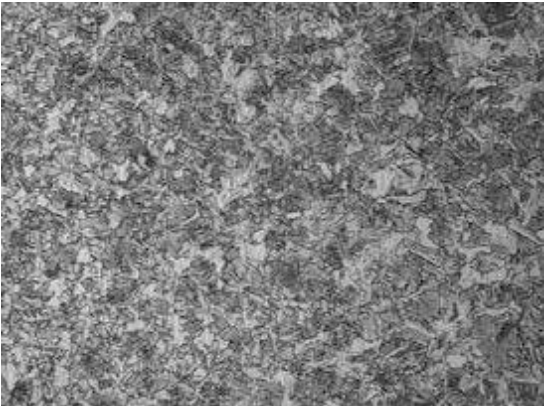
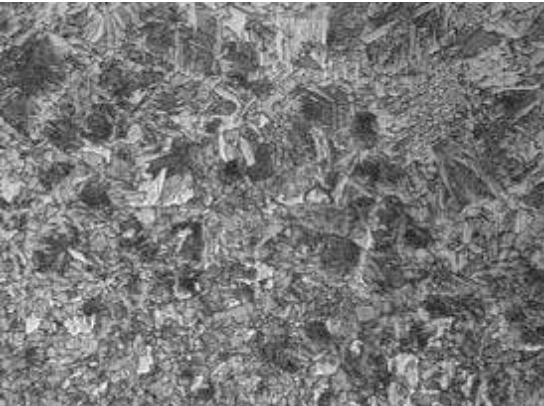
 <p>(i) ZAC-GF (raiz)</p>	 <p>(j) ZAC-GF (enchimento)</p>
 <p>(k) ZAC-GG (raiz)</p>	 <p>(l) ZAC-GG (enchimento)</p>

Tabela 2.5 – Micrografia óptica da posição descendente/vertical correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 100 vezes (continuação)

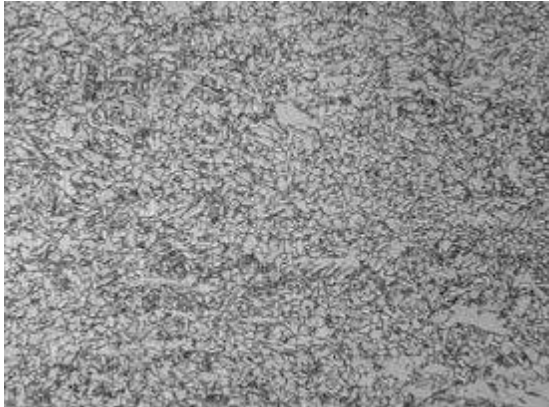
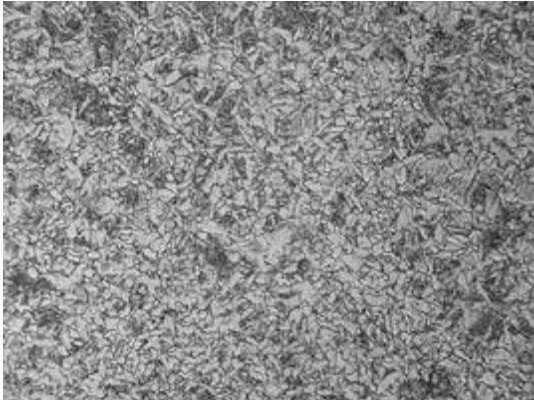
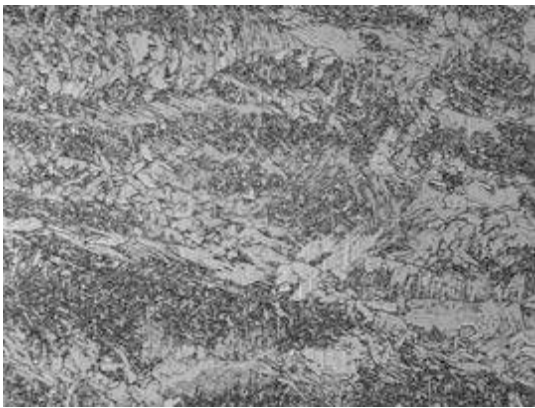
	
(m) Interface entre raiz e enchimento	(n) Interface entre centro do cordão e enchimento
	
(o) Interface entre centro do cordão e raiz	



Tabela 2.6 – Micrografia óptica da posição sobrecabeça correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 100 vezes

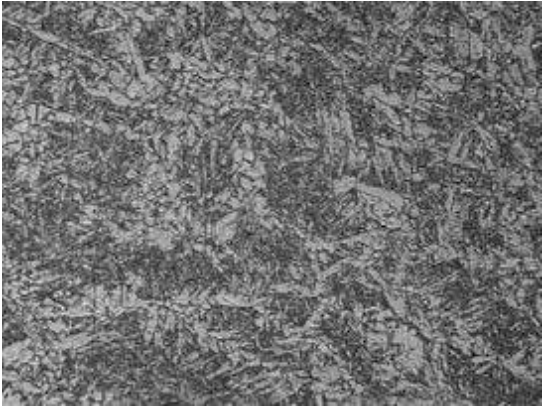

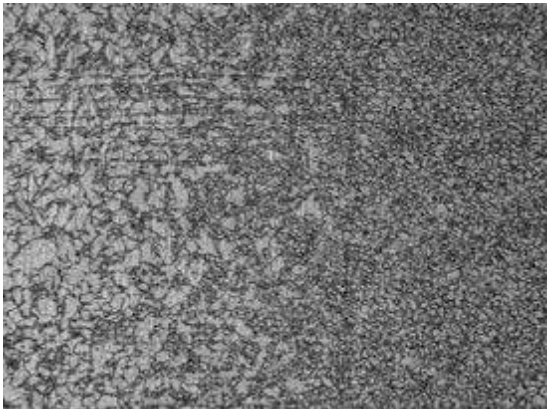
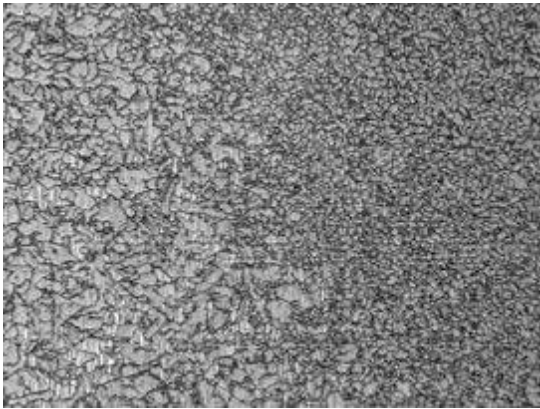
SOBRECABEÇA	
	
(a) ZF (raiz)	(b) ZF (enchimento)
	
(c) Interface entre MB e ZAC-GF (raiz)	(d) Interface entre MB e ZAC-GF (enchimento)

Tabela 2.6 – Micrografia óptica da posição sobrecabeça correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 100 vezes (continuação)

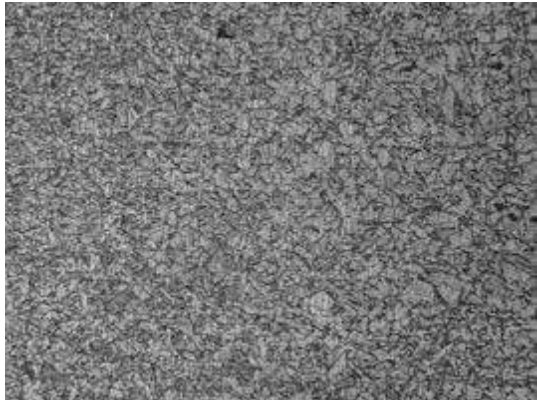
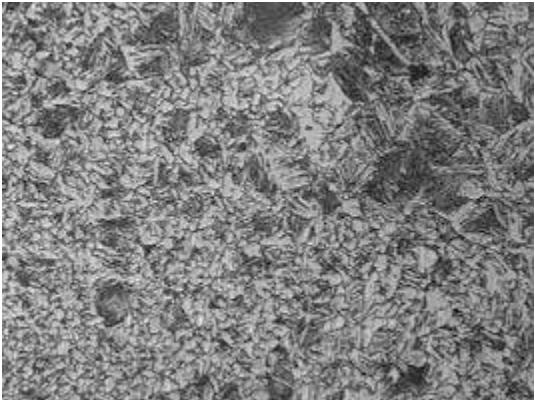

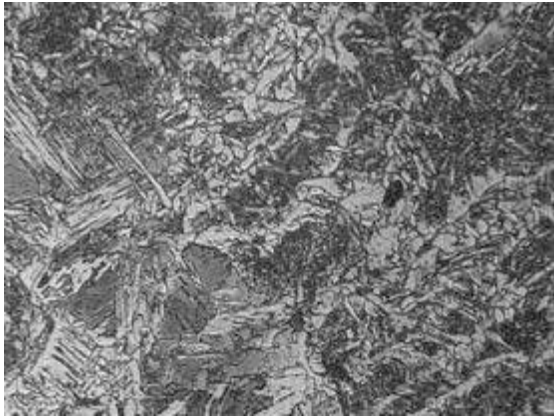
	
(e) Interface ZAC-GF e ZAC-GG (raiz)	(f) Interface ZAC-GF e ZAC-GG (enchimento)
	
(g) Interface ZAC-GG e ZF (raiz)	(h) Interface ZAC-GG e ZF (enchimento)

Tabela 2.6 – Micrografia óptica da posição sobrecabeça correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 100 vezes (continuação)

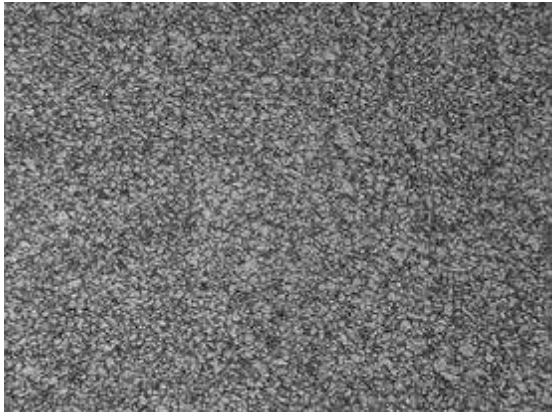
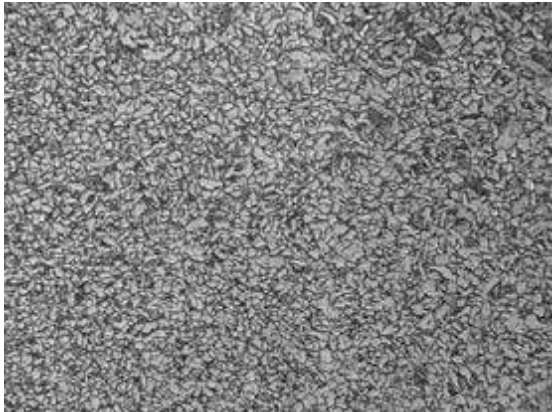
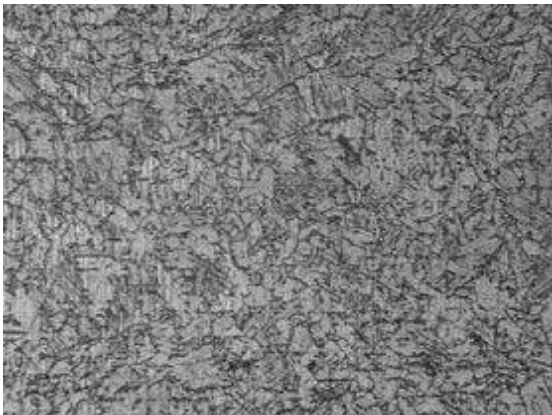
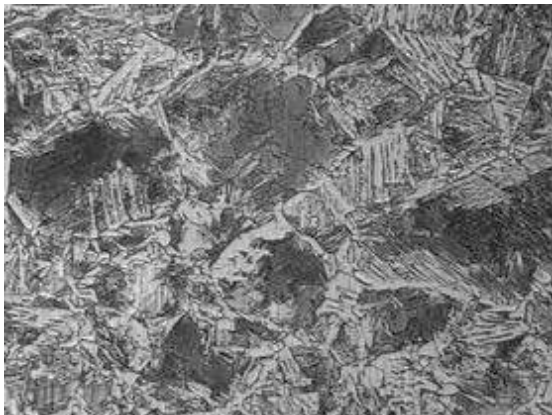

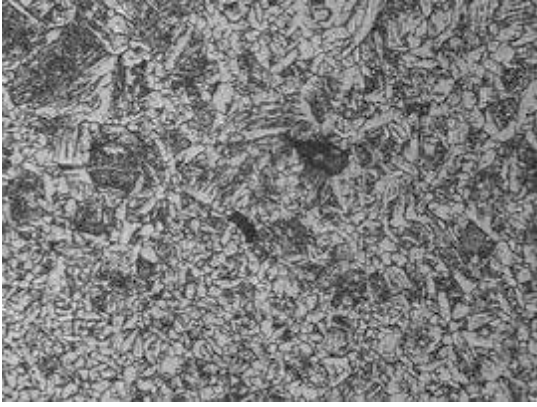
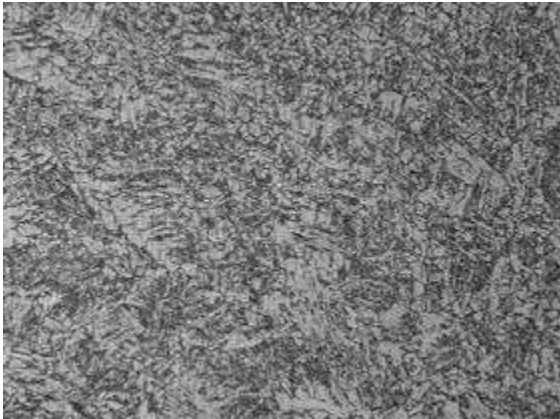
 <p>(i) ZAC-GF (raiz)</p>	 <p>(j) ZAC-GF (enchimento)</p>
 <p>(k) ZAC-GG (enchimento)</p>	 <p>(l) ZAC-GG (enchimento)</p>



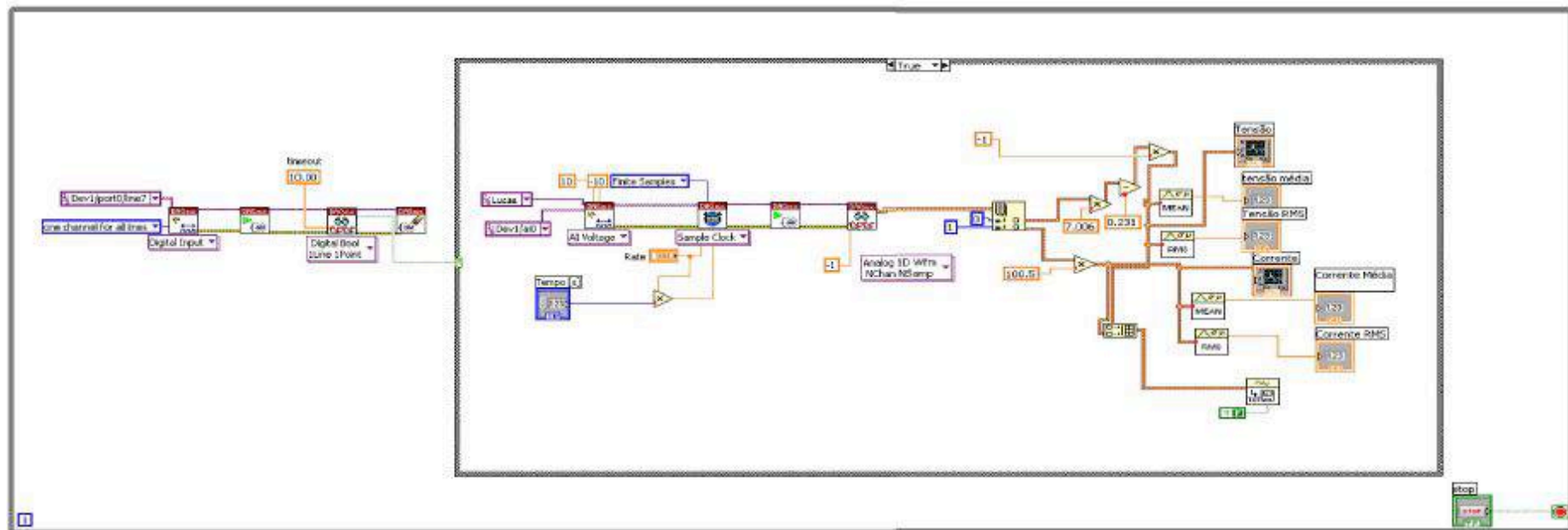
Tabela 2.6 – Micrografia óptica da posição sobrecabeça correspondente aos pontos do ensaio de dureza (item 5.3.3.7) com aumento da lente em 100 vezes (continuação)

 <p data-bbox="245 846 769 882">(m) Interface entre raiz e enchimento</p>	 <p data-bbox="826 846 1362 909">(n) Interface entre centro dos cordões e enchimento</p>
 <p data-bbox="239 1438 775 1509">(o) Interface entre centro dos cordões e raiz</p>	

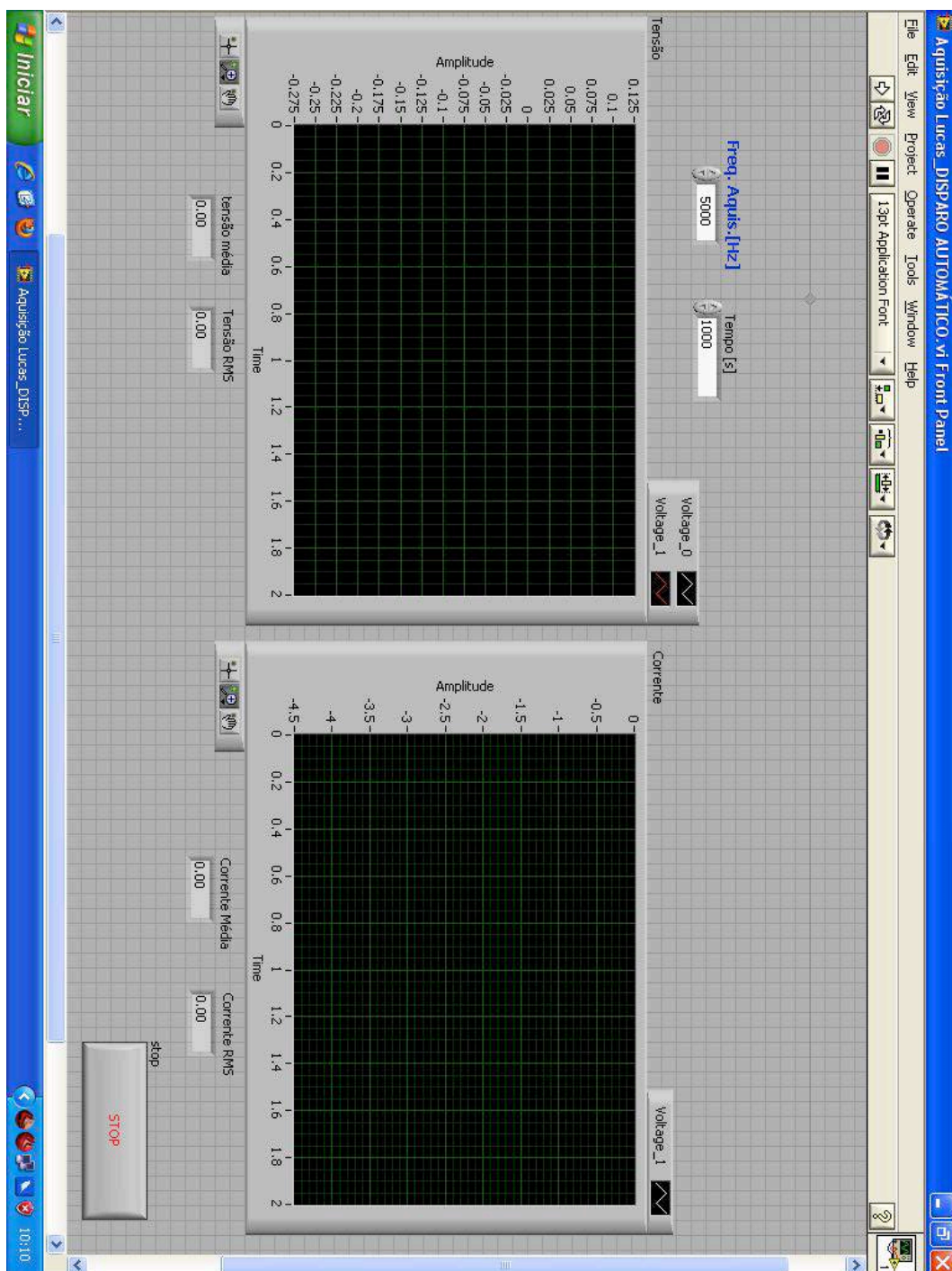


## APÊNDICE III

**Programa: Aquisição de Sinais de Corrente e Tensão com Sistema de Disparo Sincronizado com o Tartilope e a Fonte de Soldagem**



**Programa: Aquisição de Sinais de Corrente e Tensão com Sistema de Disparo Sincronizado com o Tartilope e a Fonte de Soldagem - Interface Amigável Homem Máquina**



## APÊNDICE IV

### Ensaios Preliminares com Câmera Termográfica: Compilação da Imagem em Valores Numéricos (Código Completo em MATLAB®) (cameratermica.m)

```
clear all
close all
clc

posy=240-202; % Define a coordenada "y" da linha (posição) a ser analisada
posx1=100; % Define a coordenada "x1" da linha (posição) a ser analisada
posx2=269; % Define a coordenada "x2" da linha (posição) a ser analisada

% Leitura do número de quadros
[nomearquivo,nomecaminho] = uigetfile('*.SFMOV','Arquivo SFMOV'); % Abre
caixa de diálogo para seleção do arquivo com extensão *.SFMOV
fid = fopen([nomecaminho,nomearquivo(1:length(nomearquivo)-6),'.pod']); %
Abre arquivo selecionado *.pod
fseek(fid,-22,'eof'); % Elimina cabeçalho do arquivo binário
tline = fgetl(fid); % Leitura do número de quadros
fclose(fid); % Fecha arquivo *.pod
nframes=str2num(tline(1:6))+1 % Converte string para número (adiciona 1,
pois, o endereço começa no número 0000)

% Leitura do arquivo *.SFMOV
fid = fopen([nomecaminho,nomearquivo]); % Abre arquivo com extensão *.SFMOV
selecionado anteriormente
fseek(fid,-320*240*nframes*4,'eof'); % Elimina cabeçalho do arquivo binário
- "4" é devido aos 32 bits - contabilização do número de caracteres lidos
no arquivo de trás pra frente
arq = fread(fid,[320,nframes*240],'float32',0,'l'); % Para o arquivo Q (com
menos quadros) é [320,176*240]
arq=arq-273.15; % Converte Kelvin para Graus Celcius
fclose(fid); % Fecha arquivo

% Gera perfil de temperatura na linha especificada (posy, posx1, posx2)
anteriormente
n=1;
imagem=flipud(arq(1:320,((n-1)*240+1):(n*240)')); % Gira matrix para girar
figura 180 graus
figure % Gera imagem
contourf(imagem); % plota contornos na imagem
axis equal % Ajusta eixos simetricamente
%
line([posx1 posx2],[posy posy]) % especifica linha da matriz para todos os
quadro
%
figure % Gera figura da linha
aa=imagem(posy,posx1:posx2); % armazena em "aa" a posição da matriz para
geração do gráfico. Lembrando que são 18867 matrizes.
plot(aa) % plota gráfico da posição (posy,posx1:posx2) levando em
consideração as 18867 matrizes
```

```

% Gera gráficos 2D em sequência das nframes (ex. 18867 quadros)
linha=zeros(nframes,posx2-posx1+1); % Cria vetor linha com todas as
posições com valores zero
for ii=1:nframes, % Varre de 1 até o número de quadros
    dummy=flipud(arq(1:320,((ii-1)*240+1):(ii*240))'); % inverte imagem 180
    graus em intervalos de((ii-1)*240+1 e envia para dummy
    linha(ii,:)=dummy(posy,posx1:posx2); % aponta região/linha de interesse
    %plot(linha(ii,:))
    %pause(0.01) %Ajusta velocidade ou tempo entre quadros
end

```

figure

```

surf(linha(1:100:nframes,:)) % Gera gráfico 3D de 100 em 100 quadros

```

```

%Gera filme da soldagem térmica no matlab
for ii=1:20:nframes,
    surf(flipud(arq(1:320,((ii-1)*240+1):(ii*240))')); % plota 3D
    axis([0 320 0 240 0 500]); % Ajusta escala do filme
    view([45 45]) % Ajusta ângulo de visão do filme
    pause(0.01) % Ajusta tempo entre os quadros
end

```

figure

```

% Plota o perfil de temperatura na linha especificada anteriormente nos
intervalos solicitados
for ii=3750:3900,
    plot(linha(ii,:))
    pause(0.2)
end

```

```

linha=linha'; % Na forma transposta o Origin consegue ler no máximo 6000
frames
dummy=[nomecaminho,nomearquivo(1:length(nomearquivo)-6),'.txt']; % Carrega
dummy com as coordenadas da linha analisada
save(dummy,'linha','-ASCII'); %Gera *.txt da matriz com todos os quadros
filmados - para enviar ao OriginPro, deve-se fazer a operação de matriz
transposta dentro do próprio programa OriginPro
dlmwrite(dummy, linha, 'delimiter', ' ','precision', '%.2f') % Geração do
vídeo (gera várias figuras: As figuras devem ser juntadas em um software de
edição específico, ex. VideoMach)

```

```

close all
figure('Renderer','zbuffer') % mostra as imagens sem analisar

```

```

% definição do limite do vídeo
ii=1;
limx1=50; % x vai de 1 a 320
limx2=320;
limy1=75; % y vai de 1 a 240
limy2=240;

```

```

pulo=1; % Definição do número de pulos de linha na matriz (resolução da
matriz)
surf(flipud(arq(limx1:pulo:limx2,((ii-1)*240+limy1):pulo:(ii*240-(240-
limy2))))',...
'FaceColor','interp'); %,'EdgeColor','none'
caxis([30 500]);% Define a escala de cor (azul = 30 graus e vermelho=500
graus)
%surf(flipud(arq(1:1:320,((ii-1)*240+1):1:(ii*240)))));
set(gcf,'Color','w','Position',[1 1 1920 1080]) % seta resolução do monitor
- este dado deve ser modificado de acordo com a resolução do mesmo
view([37.5 30]); % Define angulo de visualização do vídeo
axis([1 limx2-limx1 1 limy2-limy1 0 500])% Define o limite dos eixos no
vídeo
axis off % elimina os eixos no vídeo
daspect([1 1 10]); % Fator de diminuição das escalas dos eixos
set(gca,'NextPlot','replaceChildren');
for ii = 1:1:nframes,
    surf(flipud(arq(limx1:pulo:limx2,((ii-1)*240+limy1):pulo:(ii*240-(240-
limy2))))',...
'FaceColor','interp'); %,'EdgeColor','none'
    caxis([30 500]);
    set(gcf,'Color','w','Position',[1 1 1920 1080])
    view([37.5 30]);
    axis([1 limx2-limx1 1 limy2-limy1 0 500])
    axis off
    daspect([1 1 10]);
    F=getframe;
    im=frame2im(F);
    imwrite(im,['teste',num2str(ii),'.jpg'],'jpg','Quality',100);
end

```

## GERAÇÃO DA MATRIZ (.txt) NA LINHA ESPECIFICADA NO INTERVALO DE QUADROS SOLICITADO

Obs.: O arquivo é gravado na pasta onde se encontra o arquivo .SMOV

```

clear all
close all
clc

```

```

posy=240-202; % Define a coordenada "y" da linha (posição) a ser analisada
posx1=100; % Define a coordenada "x1" da linha (posição) a ser analisada
posx2=269; % Define a coordenada "x2" da linha (posição) a ser analisada

```

```

% Leitura do número de quadros
[nomearquivo,nomecaminho] = uigetfile('*.SFMOV','Arquivo SFMOV'); % Abre
caixa de diálogo para seleção do arquivo com extensão *.SFMOV
fid = fopen([nomecaminho,nomearquivo(1:length(nomearquivo)-6),'.pod']); %
Abre arquivo selecionado *.pod
fseek(fid,-22,'eof'); % Elimina cabeçalho do arquivo binário
tline = fgetl(fid); % Leitura do número de quadros
fclose(fid); % Fecha arquivo *.pod
nframes=str2num(tline(1:6))+1 % Converte string para número (adiciona 1,
pois, o endereço começa no número 0000)

```

```

% Leitura do arquivo *.SFMOV

```

```

fid = fopen([nomecaminho,nomearquivo]); % Abre arquivo com extensão *.SFMov
selecionado anteriormente
fseek(fid,-320*240*nframes*4,'eof'); % Elimina cabeçalho do arquivo binário
- "4" é devido aos 32 bits - contabilização do número de caracteres lidos
no arquivo de trás pra frente
arq = fread(fid,[320,nframes*240],'float32',0,'l'); % Para o arquivo Q (com
menos quadros) é [320,176*240]
arq=arq-273.15; % Converte Kelvin para Graus Celcius
fclose(fid); % Fecha arquivo

% Gera gráficos 2D em sequência das nframes (ex. 18867 quadros)
linha=zeros(nframes,posx2-posx1+1); % Cria vetor linha com todas as
posições com valores zero
for ii=1:nframes, % Varre de 1 até o número de quadros
    dummy=flipud(arq(1:320,((ii-1)*240+1):(ii*240))); % inverte imagem 180
    graus em intervalos de((ii-1)*240+1 e envia para dummy
    linha(ii,:)=dummy(posy,posx1:posx2); % aponta região/linha de interesse
    %plot(linha(ii,:))
    %pause(0.001) %Ajusta velocidade ou tempo entre quadros
end

% Plota o perfil de temperatura na linha especificada anteriormente nos
intervalos solicitados

figure
for ii=3750:3900, % Intervalo solicitado - número de quadros total
    registrado no arquivo .POD
    plot(linha(ii,:))
    pause(0.2)
end

linha=linha'; % Na forma transposta o Origin consegue ler no máximo 6000
frames
dummy=[nomecaminho,nomearquivo(1:length(nomearquivo)-6),'.txt']; % Carrega
dummy com as coordenadas da linha analisada
save(dummy,'linha','-ASCII'); %Gera *.txt da matriz com todos os quadros
filmados - para enviar ao OriginPro, deve-se fazer a operação de matriz
transposta dentro do próprio programa OriginPro
%dlmwrite(dummy, linha, 'delimiter', ' ','precision', '%.2f') % Geração do
vídeo (gera várias figuras: As figuras devem ser juntadas em um software de
edição específico, ex. VideoMach)

```

### GERAÇÃO DO PERFIL DE TEMPERATURA NA LINHA ESPECIFICADA (POSY, POSX1, POSX2) ANTERIORMENTE LEVANDO EM CONSIDERAÇÃO TODAS AS MATRIZES

```

clear all
close all
clc

```

```

posy=240-202; % Define a coordenada "y" da linha (posição) a ser analisada
posx1=100; % Define a coordenada "x1" da linha (posição) a ser analisada

```



```

posx2=269; % Define a coordenada "x2" da linha (posição) a ser analisada

% Leitura do número de quadros
[nomearquivo,nomecaminho] = uigetfile('*.SFMOV','Arquivo SFMOV'); % Abre
caixa de diálogo para seleção do arquivo com extensão *.SFMOV
fid = fopen([nomecaminho,nomearquivo(1:length(nomearquivo)-6),'.pod']); %
Abre arquivo selecionado *.pod
fseek(fid,-22,'eof'); % Elimina cabeçalho do arquivo binário
tline = fgetl(fid); % Leitura do número de quadros
fclose(fid); % Fecha arquivo *.pod
nframes=str2num(tline(1:6))+1 % Converte string para número (adiciona 1,
pois, o endereço começa no número 0000)

% Leitura do arquivo *.SFMOV
fid = fopen([nomecaminho,nomearquivo]); % Abre arquivo com extensão *.SFMOV
selecionado anteriormente
fseek(fid,-320*240*nframes*4,'eof'); % Elimina cabeçalho do arquivo binário
- "4" é devido aos 32 bits - contabilização do número de caracteres lidos
no arquivo de trás pra frente
arq = fread(fid,[320,nframes*240],'float32',0,'l'); % Para o arquivo Q (com
menos quadros) é [320,176*240]
arq=arq-273.15; % Converte Kelvin para Graus Celcius
fclose(fid); % Fecha arquivo

% Gera perfil de temperatura na linha especificada (posy, posx1, posx2)
anteriormente
n=1;
imagem=flipud(arq(1:320,((n-1)*240+1):(n*240))'); % Gira matrix para girar
figura 180 graus
figure % Gera imagem
contourf(imagem); % plota contornos na imagem
axis equal % Ajusta eixos simetricamente
%
line([posx1 posx2],[posy posy]) % especifica linha da matriz para todos os
quadro
%
figure % Gera figura da linha
aa=imagem(posy,posx1:posx2); % armazena em "aa" a posição da matriz para
geração do gráfico. Lembrando que são 18867 matrizes.
plot(aa) % plota gráfico da posição (posy,posx1:posx2) levando em
consideração as 18867 matrizes

```

### GERAÇÃO DE GRÁFICOS 2D EM SEQUÊNCIA DAS NFRAMES (EX. 18867 QUADROS)

```

clear all
close all
clc

posy=240-202; % Define a coordenada "y" da linha (posição) a ser analisada
posx1=100; % Define a coordenada "x1" da linha (posição) a ser analisada
posx2=269; % Define a coordenada "x2" da linha (posição) a ser analisada

% Leitura do número de quadros

```

```

[nomearquivo,nomecaminho] = uigetfile('*.SFMov','Arquivo SFMOV'); % Abre
caixa de diálogo para seleção do arquivo com extensão *.SFMov
fid = fopen([nomecaminho,nomearquivo(1:length(nomearquivo)-6),'.pod']); %
Abre arquivo selecionado *.pod
fseek(fid,-22,'eof'); % Elimina cabeçalho do arquivo binário
tline = fgetl(fid); % Leitura do número de quadros
fclose(fid); % Fecha arquivo *.pod
nframes=str2num(tline(1:6))+1 % Converte string para número (adiciona 1,
pois, o endereço começa no número 0000)

% Leitura do arquivo *.SFMov
fid = fopen([nomecaminho,nomearquivo]); % Abre arquivo com extensão *.SFMov
selecionado anteriormente
fseek(fid,-320*240*nframes*4,'eof'); % Elimina cabeçalho do arquivo binário
- "4" é devido aos 32 bits - contabilização do número de caracteres lidos
no arquivo de trás pra frente
arq = fread(fid,[320,nframes*240],'float32',0,'1'); % Para o arquivo Q (com
menos quadros) é [320,176*240]
arq=arq-273.15; % Converte Kelvin para Graus Celcius
fclose(fid); % Fecha arquivo

% Gera gráficos 2D em sequência das nframes (ex. 18867 quadros)
linha=zeros(nframes,posx2-posx1+1); % Cria vetor linha com todas as
posições com valores zero
for ii=1:nframes, % Varre de 1 até o número de quadros
    dummy=flipud(arq(1:320,((ii-1)*240+1):(ii*240))); % inverte imagem 180
    graus em intervalos de((ii-1)*240+1 e envia para dummy
    linha(ii,:)=dummy(posy,posx1:posx2); % aponta região/linha de interesse
    plot(linha(ii,:))
    pause(0.01) %Ajusta velocidade
end

figure

```

## GERAÇÃO DE FILME DA SOLDAGEM TÉRMICA NO MATLAB®

```

clear all
close all
clc

posy=240-202; % Define a coordenada "y" da linha (posição) a ser analisada
posx1=100; % Define a coordenada "x1" da linha (posição) a ser analisada
posx2=269; % Define a coordenada "x2" da linha (posição) a ser analisada

% Leitura do número de quadros
[nomearquivo,nomecaminho] = uigetfile('*.SFMov','Arquivo SFMOV'); % Abre
caixa de diálogo para seleção do arquivo com extensão *.SFMov
fid = fopen([nomecaminho,nomearquivo(1:length(nomearquivo)-6),'.pod']); %
Abre arquivo selecionado *.pod
fseek(fid,-22,'eof'); % Elimina cabeçalho do arquivo binário
tline = fgetl(fid); % Leitura do número de quadros
fclose(fid); % Fecha arquivo *.pod
nframes=str2num(tline(1:6))+1 % Converte string para número (adiciona 1,
pois, o endereço começa no número 0000)

```

```

% Leitura do arquivo *.SFMov
fid = fopen([nomecaminho,nomearquivo]); % Abre arquivo com extensão *.SFMov
selecionado anteriormente
fseek(fid,-320*240*nframes*4,'eof'); % Elimina cabeçalho do arquivo binário
- "4" é devido aos 32 bits - contabilização do número de caracteres lidos
no arquivo de trás pra frente
arq = fread(fid,[320,nframes*240],'float32',0,'l'); % Para o arquivo Q (com
menos quadros) é [320,176*240]
arq=arq-273.15; % Converte Kelvin para Graus Celcius
fclose(fid); % Fecha arquivo

% Gera gráficos 2D em sequência das nframes (ex. 18867 quadros)
linha=zeros(nframes,posx2-posx1+1); % Cria vetor linha com todas as
posições com valores zero

figure

surf(linha(1:100:nframes,:)) % Gera gráfico 3D de 100 em 100 quadros

%Gera filme da soldagem térmica no matlab
for ii=1:20:nframes,
surf(flipud(arq(1:320,((ii-1)*240+1):(ii*240)))); % plota 3D
axis([0 320 0 240 0 500]); % Ajusta escala do filme
view([45 45]) % Ajusta ângulo de visão do filme
pause(0.3) % Ajusta tempo entre os quadros
end

```

## MATRIZ TRANSPOSTA DE ARQUIVO .TXT

```

arquivo=load('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\2T_E1_ENSAIO0001_6000frames.txt'); %Carrega arquivo .txt
arquivo=transpose(arquivo); %Faz a transposta
save('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\TRANSPOSTA\2T_E1_ENSAIO0001_6000frames_transposta.txt','arquivo','-
ASCII')%salva arquivo .txt na pasta especificada

arquivo=load('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\2T_E2_ENSAIO0004_6000frames.txt');
arquivo=transpose(arquivo);
save('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\TRANSPOSTA\2T_E2_ENSAIO0004_6000frames_transposta.txt','arquivo','-
ASCII');

arquivo=load('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\2T_R1_ENSAIO0002_6000frames.txt');
arquivo=transpose(arquivo);
save('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\TRANSPOSTA\2T_R1_ENSAIO0002_6000frames_transposta.txt','arquivo','-
ASCII');

arquivo=load('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\2T_R2_ENSAIO0002_6000frames.txt');
arquivo=transpose(arquivo);

```

```
save('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\TRANSPOTA\2T_R2_ENSAIO0002_6000frames_transposta.txt','arquivo','-
ASCII');
```

```
arquivo=load('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\3T_E1_ENSAIO0001_6000frames.txt');
arquivo=transpose(arquivo);
save('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\TRANSPOTA\3T_E1_ENSAIO0001_6000frames_transposta.txt','arquivo','-
ASCII');
```

```
arquivo=load('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\3T_E2_ENSAIO0001_6000frames.txt');
arquivo=transpose(arquivo);
save('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\TRANSPOTA\3T_E2_ENSAIO0001_6000frames_transposta.txt','arquivo','-
ASCII');
```

```
arquivo=load('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\3T_E3_ENSAIO0003_6000frames.txt');
arquivo=transpose(arquivo);
save('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\TRANSPOTA\3T_E3_ENSAIO0003_6000frames_transposta.txt','arquivo','-
ASCII');
```

```
arquivo=load('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\3T_E4_ENSAIO0002_6000frames.txt');
arquivo=transpose(arquivo);
save('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\TRANSPOTA\3T_E4_ENSAIO0002_6000frames_transposta.txt','arquivo','-
ASCII');
```

```
arquivo=load('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\3T_R1_ENSAIO0002_6000frames.txt');
arquivo=transpose(arquivo);
save('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\TRANSPOTA\3T_R1_ENSAIO0002_6000frames_transposta.txt','arquivo','-
ASCII');
```

```
arquivo=load('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\3T_R2_ENSAIO0001_6000frames.txt');
arquivo=transpose(arquivo);
save('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\TRANSPOTA\3T_R2_ENSAIO0001_6000frames_transposta.txt','arquivo','-
ASCII');
```

```
arquivo=load('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\3T_R3_ENSAIO0001_6000frames.txt');
arquivo=transpose(arquivo);
save('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\TRANSPOTA\3T_R3_ENSAIO0001_6000frames_transposta.txt','arquivo','-
ASCII');
```

```
arquivo=load('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS
.TXT\3T_R4_ENSAIO0001_6000frames.txt');
arquivo=transpose(arquivo);
```

```
save('D:\1.CABECA\ORIGINPRO\ARQUIVOS  
.TXT\TRANSPOTA\3T_R4_ENSAIO0001_6000frames_transposta.txt','arquivo','-  
ASCII');
```

## APÊNDICE V

### Ensaio Preliminares com Câmera Termográfica: Dados Expurgados por meio da Análise de Gráficos

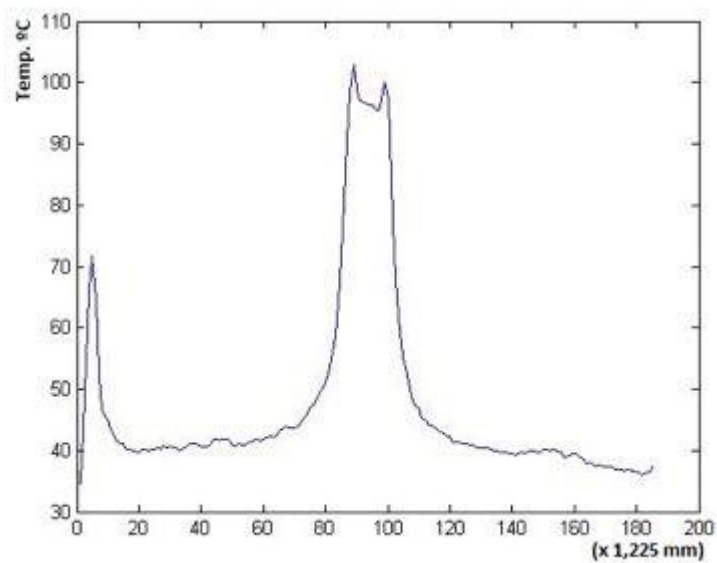


Figura 5.1. Perfil de temperatura do passe de enchimento executado sobre duto formado por 2 tubos (Ensaio 2T\_E1)

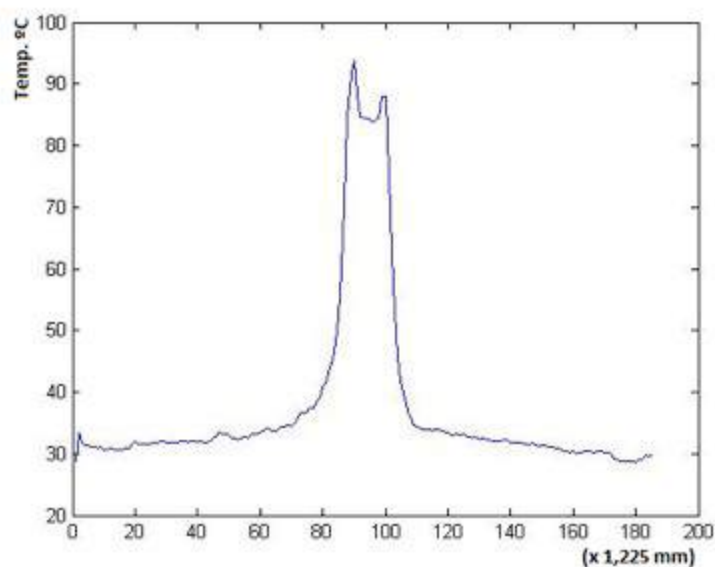


Figura 5.2. Perfil de temperatura do passe de enchimento executado sobre duto formado por 2 tubos (Ensaio 2T\_E2)



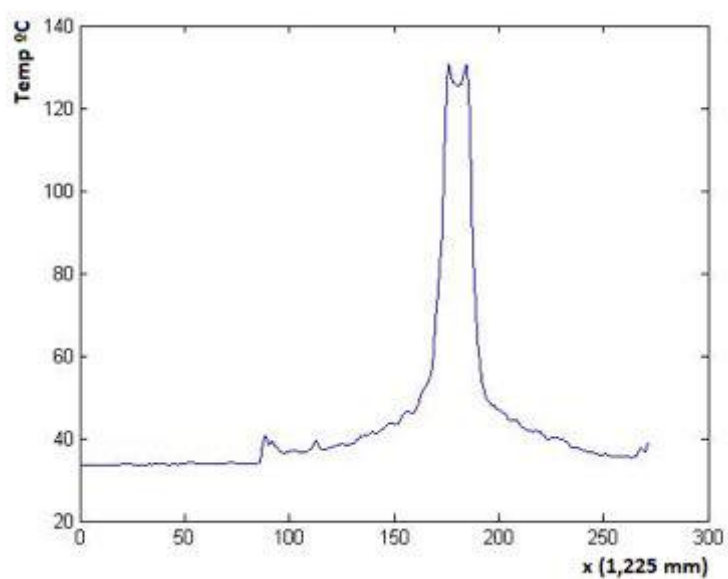


Figura 5.3. Perfil de temperatura do passe de enchimento executado sobre duto formado por 3 tubos (Ensaio 3T\_E1)

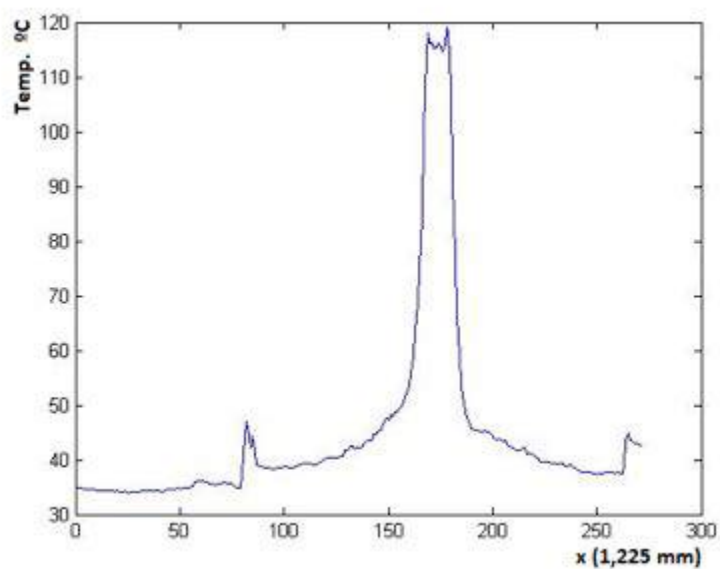


Figura 5.4. Perfil de temperatura do passe de enchimento executado sobre duto formado por 3 tubos (Ensaio 3T\_E2)

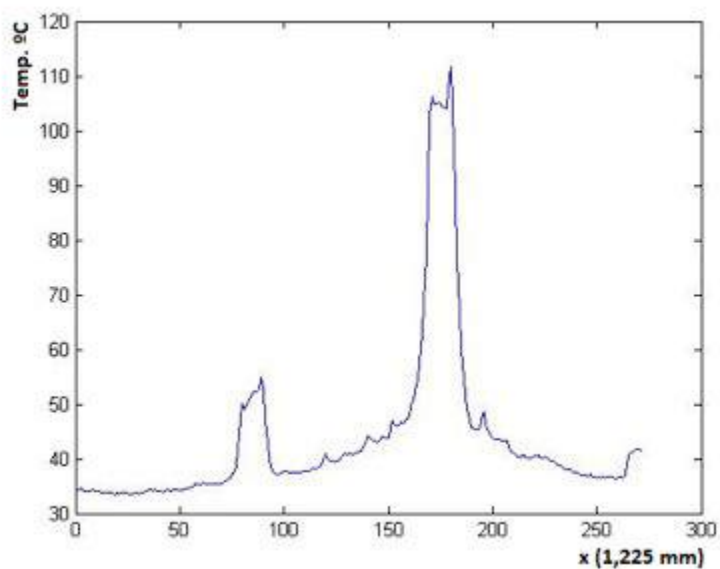


Figura 5.5. Perfil de temperatura do passe de enchimento executado sobre duto formado por 3 tubos (Ensaio 3T\_E3)

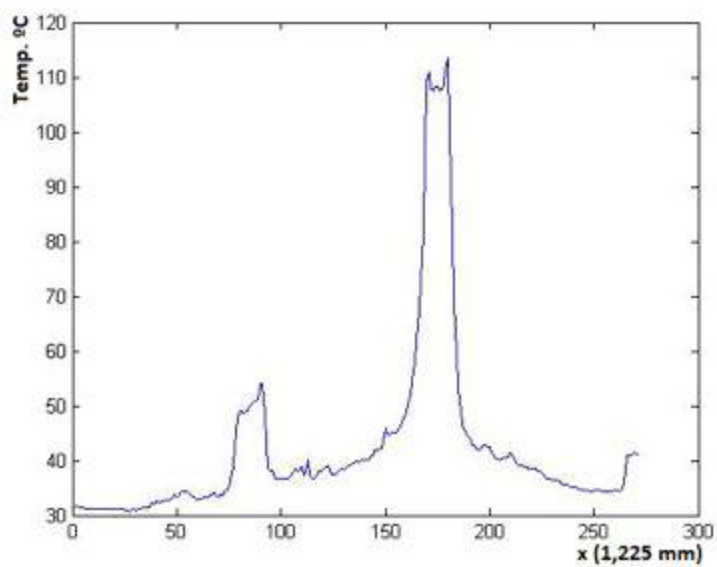


Figura 5.6. Perfil de temperatura do passe de enchimento executado sobre duto formado por 3 tubos (Ensaio 3T\_E4)

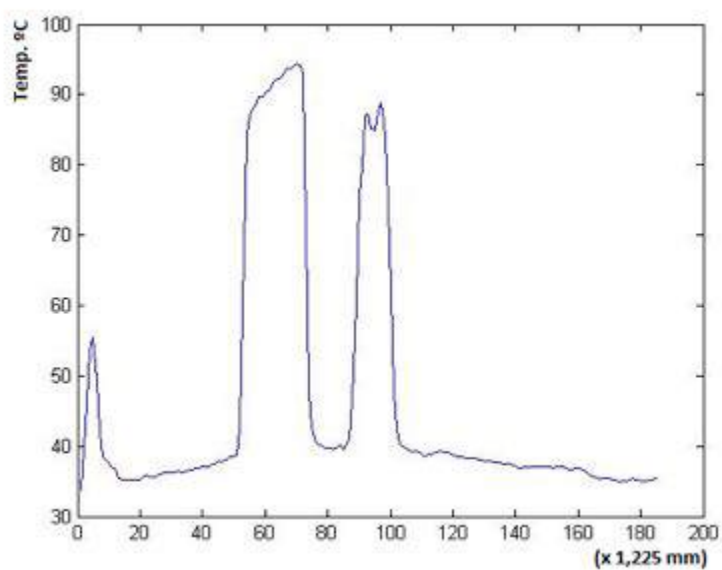


Figura 5.7. Perfil de temperatura do passe de raiz executado sobre duto formado por 2 tubos (Ensaio 2T\_R1)

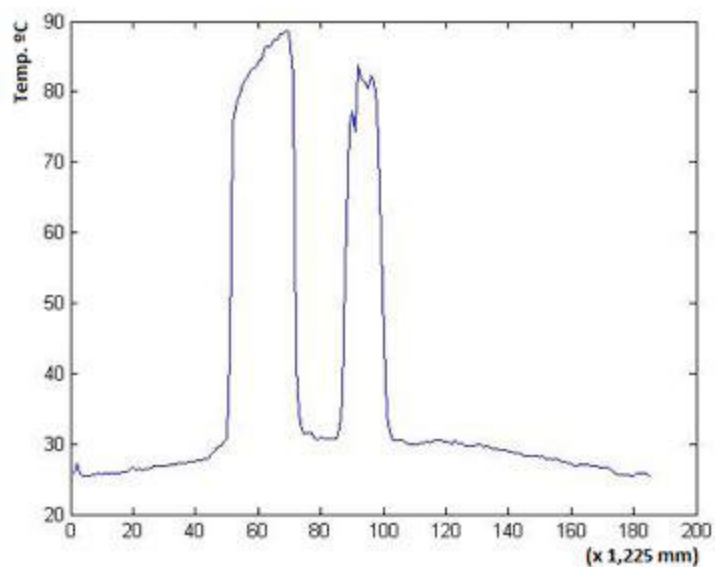


Figura 5.8. Perfil de temperatura do passe de raiz executado sobre duto formado por 2 tubos (Ensaio 2T\_R2)

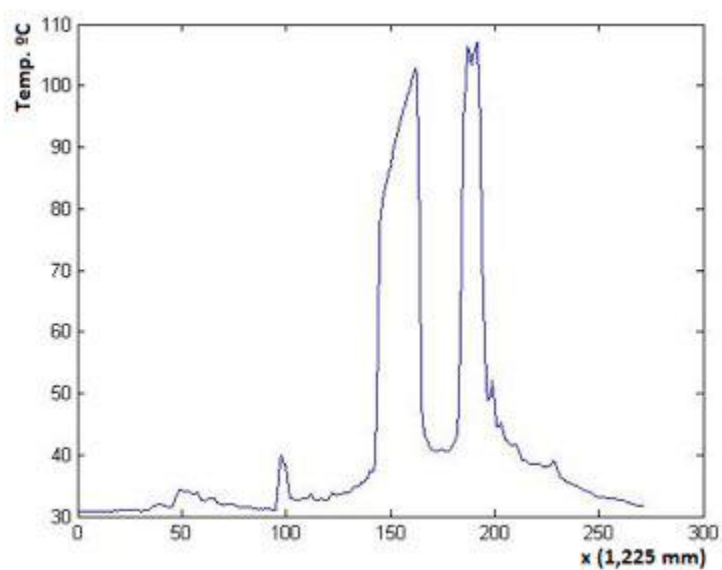


Figura 5.9. Perfil de temperatura do passe de raiz executado sobre duto formado por 3 tubos (Ensaio 3T\_R1)

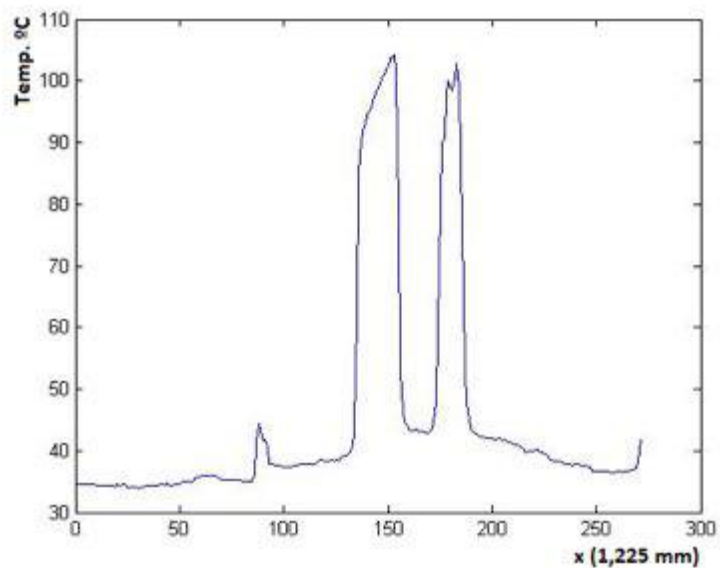


Figura 5.10. Perfil de temperatura do passe de raiz executado sobre duto formado por 3 tubos (Ensaio 3T\_R2)

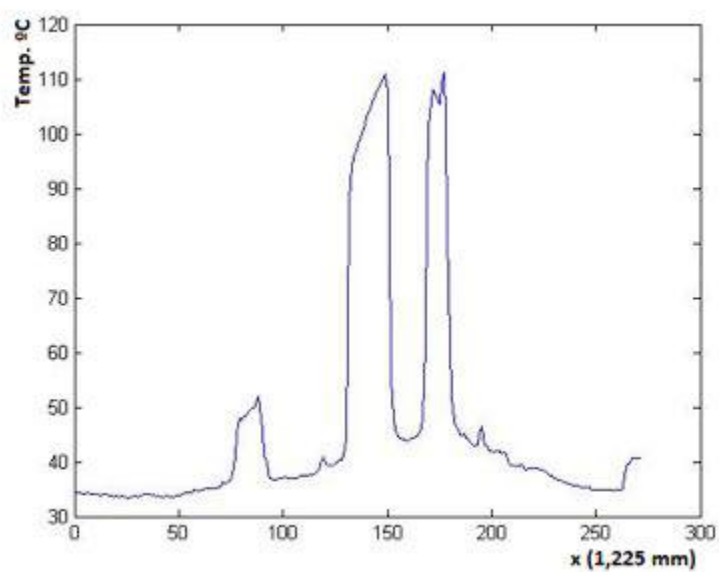


Figura 5.11. Perfil de temperatura do passe de raiz executado sobre duto formado por 3 tubos (Ensaio 3T\_R3)

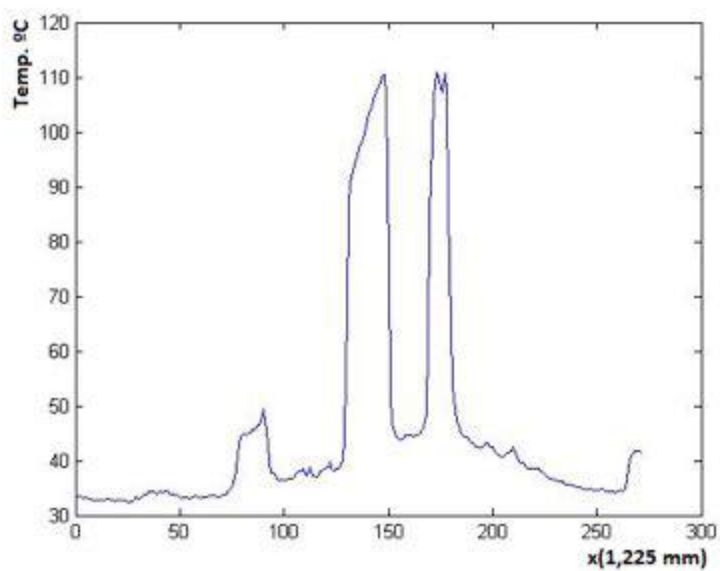


Figura 5.12 Perfil de temperatura do passe de raiz executado sobre duto formado por 3 tubos (Ensaio 3T\_R4)

## APÊNDICE VI

### Ensaio Preliminares com Câmera Termográfica: Imagens dos Cordões de Solda




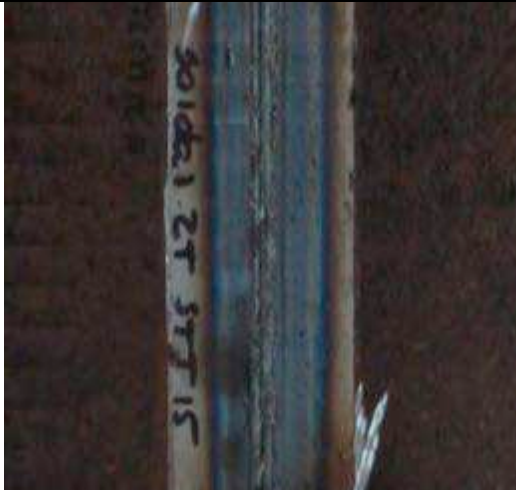
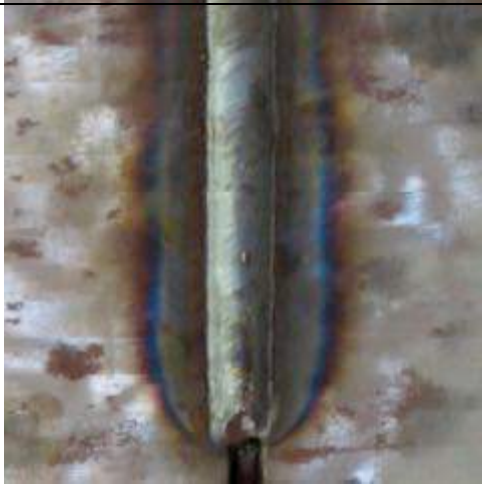

Posição	ENCHIMENTO (2T_E1)	RAIZ(2T_R1)
PLANA		
VERTICAL		
SOBRE-CABEÇA		

Figura 6.1. Cordão de solda dos testes preliminares com câmera termográfica para os passes de enchimento (2T\_E1) e de raiz (2T\_R1) em duto formado com 2 tubos









Posição	ENCHIMENTO (2T_E2)	RAIZ(2T_R2)
PLANA		
VERTICAL		
SOBRE-CABEÇA		

Figura 6.2. Cordão de solda dos testes preliminares com câmera termográfica para os passes de enchimento (2T\_E2) e de raiz RAIZ(2T\_R2) em duto formado com 2 tubos



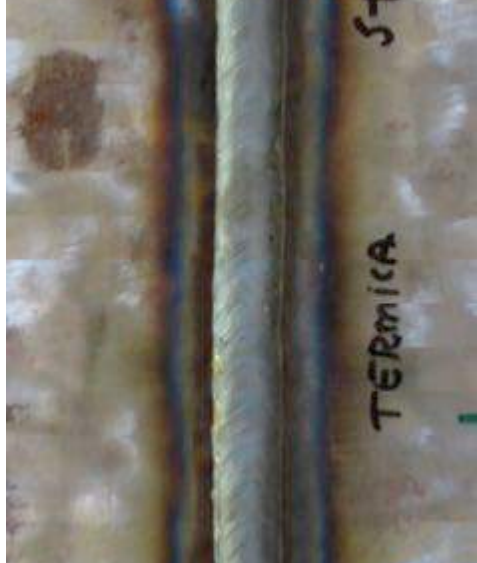



Posição	ENCHIMENTO (3T_E1)	RAIZ(3T_R1)
PLANA		
VERTICAL		
SOBRE-CABEÇA		

Figura 6.3. Cordão de solda dos testes preliminares com câmera termográfica para os passes de enchimento (3T\_E1) e de raiz RAIZ(3T\_R1) em duto formado com 3 tubos









Posição	ENCHIMENTO (3T_E2)	RAIZ(3T_R2)
PLANA		
VERTICAL		
SOBRE-CABEÇA		

Figura 6.4. Cordão de solda dos testes preliminares com câmera termográfica para os passes de enchimento (3T\_E2) e de raiz RAIZ(3T\_R2) em duto formado com 3 tubos

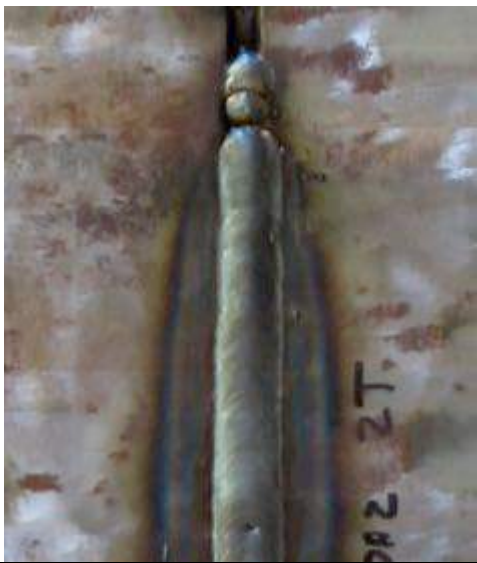





Posição	ENCHIMENTO (2T_E2)	RAIZ(2T_R2)
PLANA		
VERTICAL		
SOBRE-CABEÇA		

Figura 6.5. Cordão de solda dos testes preliminares com câmera termográfica para os passes de enchimento (2T\_E2) e de raiz RAIZ(2T\_R2) em duto formado com 2 tubos





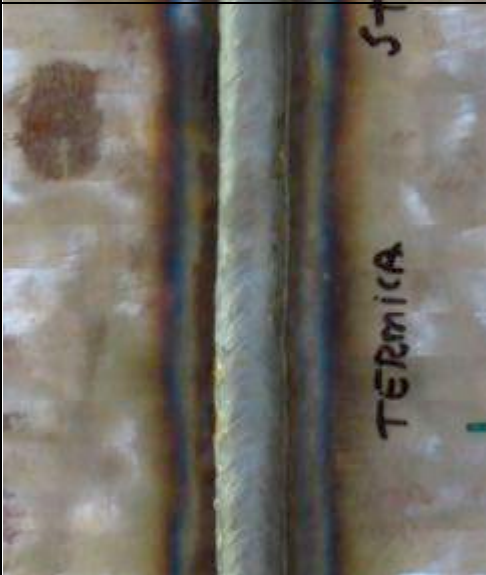



Posição	ENCHIMENTO (3T_E1)	RAIZ(3T_R1)
PLANA		
VERTICAL		
SOBRE-CABEÇA		

Figura 6.6. Cordão de solda dos testes preliminares com câmera termográfica para os passes de enchimento (3T\_E1) e de raiz RAIZ(3T\_R1) em duto formado com 3 tubos





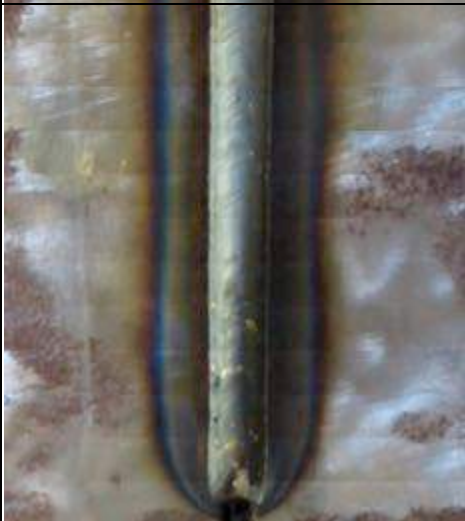

Posição	ENCHIMENTO (3T_E3)	RAIZ(3T_R3)
PLANA		
VERTICAL		
SOBRE-CABEÇA		

Figura 6.7. Cordão de solda dos testes preliminares com câmera termográfica para os passes de enchimento (3T\_E3) e de raiz RAIZ(3T\_R3) em duto formado com 3 tubos









Posição	ENCHIMENTO (2T_E2)	RAIZ(2T_R2)
PLANA		
VERTICAL		
SOBRE-CABEÇA		

Figura 6.8. Cordão de solda dos testes preliminares com câmera termográfica para os passes de enchimento (2T\_E2) e de raiz RAIZ(2T\_R2) em duto formado com 2 tubos







Posição	ENCHIMENTO (3T_E1)	RAIZ(3T_R1)
PLANA		
VERTICAL		
SOBRE-CABEÇA		

Figura 6.9. Cordão de solda dos testes preliminares com câmera termográfica para os passes de enchimento (3T\_E1) e de raiz RAIZ(3T\_R1) em duto formado com 3 tubos









Posição	ENCHIMENTO (3T_E2)	RAIZ(3T_R2)
PLANA		
VERTICAL		
SOBRE-CABEÇA		

Figura 6.10. Cordão de solda dos testes preliminares com câmera termográfica para os passes de enchimento (3T\_E2) e de raiz RAIZ(3T\_R2) em duto formado com 3 tubos







Posição	ENCHIMENTO (2T_E2)	RAIZ(2T_R2)
PLANA		
VERTICAL		
SOBRE-CABEÇA		

Figura 6.11. Cordão de solda dos testes preliminares com câmera termográfica para os passes de enchimento (2T\_E2) e de raiz RAIZ(2T\_R2) em duto formado com 2 tubos









Posição	ENCHIMENTO (3T_E1)	RAIZ(3T_R1)
PLANA		
VERTICAL		
SOBRE-CABEÇA		

Figura 6.12. Cordão de solda dos testes preliminares com câmera termográfica para os passes de enchimento (3T\_E1) e de raiz RAIZ(3T\_R1) em duto formado com 3 tubos







Posição	ENCHIMENTO (3T_E4)	RAIZ(3T_R4)
PLANA		
VERTICAL		
SOBRE-CABEÇA		

Figura 6.13. Cordão de solda dos testes preliminares com câmera termográfica para os passes de enchimento (3T\_E4) e de raiz RAIZ(3T\_R4) em duto formado com 3 tubos



## APÊNDICE VII

### Procedimento de Planificação dos Cordões de Solda em Dutos (Pós Filmagem)

O procedimento de planificação dos cordões de solda é subdividido em 4 etapas: extração de imagens para cálculos preliminares, mensuração da quantidade de pixels entre quadros consecutivos, subdivisão da filmagem em imagens fatiadas e união das imagens subdivididas. A seguir é descrito o procedimento de geração das imagens.

Primeiramente, importar o vídeo gravado em extensão (.mov) para o software VideoMach® (Figura A). Para tal, executar o comando: File -> Open Media File.

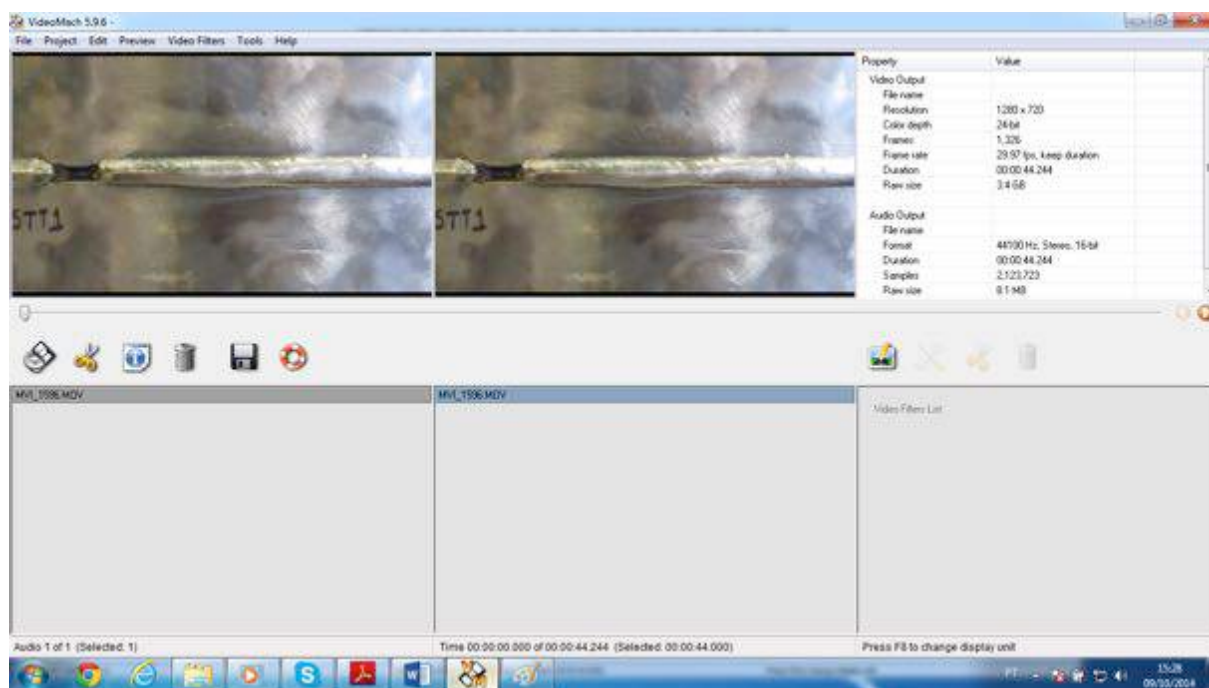


Figura A. Tela ambiente do Software VideoMach®

Na parte superior do software VideoMach® são mostradas imagens do vídeo carregado. A imagem mostrada à esquerda é o arquivo original e o da direita é uma prévia do processamento (arquivo modificado).

Após carregar o vídeo, é indicado no canto superior direito as informações de gravação do vídeo. O detalhe dos dados é mostrado na Figura B.

Video Output		Video Output	
File name	C:\Users\Luiz_Lab\Desktop\	File name	
Codec	JPEG Quality: 85%	Resolution	1280 x 720
Resolution	640 x 480	Color depth	24-bit
Color depth	24-bit	Frames	1,326
Frames	2	Frame rate	29.97 fps, keep duration
Frame rate	2 fps, keep duration	Duration	00:00:44.244
Duration	00:00:01.034	Raw size	3.4 GB
Raw size	1.8 MB		
<b>Passe de Raiz</b>		Audio Output	
		File name	
		Format	44100 Hz, Stereo, 16-bit
		Duration	00:00:44.244
		Samples	2,123,723
		Raw size	8.1 MB
		<b>Passe de Enchimento</b>	

Figura B. Informações da gravação (VideoMach®)

Para o passe de enchimento o vídeo foi gravado com 29,97 quadros por segundo e a resolução de 1280x72. Já para o passe de raiz a resolução foi de 640x480. Estes dados são importantes e serão utilizados em procedimentos mais adiante.

Inicialmente, é preciso saber quantos pixels um ponto fixo do vídeo se deslocou em 1 segundo na filmagem, ou seja, quantos pixels são deslocados após 29,97 segundos. Essa quantidade de pixels determinará a largura da fatia gerada para montagem do “quebra cabeças”.

Portanto, será mostrado a seguir o procedimento para extrair imagens em 2 quadros por segundo utilizando o software VideoMach®. O software Photoshop® servirá de apoio para mensuração dos pixels.

### Procedimento 1: Extração de imagens para cálculos preliminares

Clique no ícone mostrado na Figura C (Set in/out point (“tesourinha”)). Após clicar abrirá a janela mostrada na Figura D.

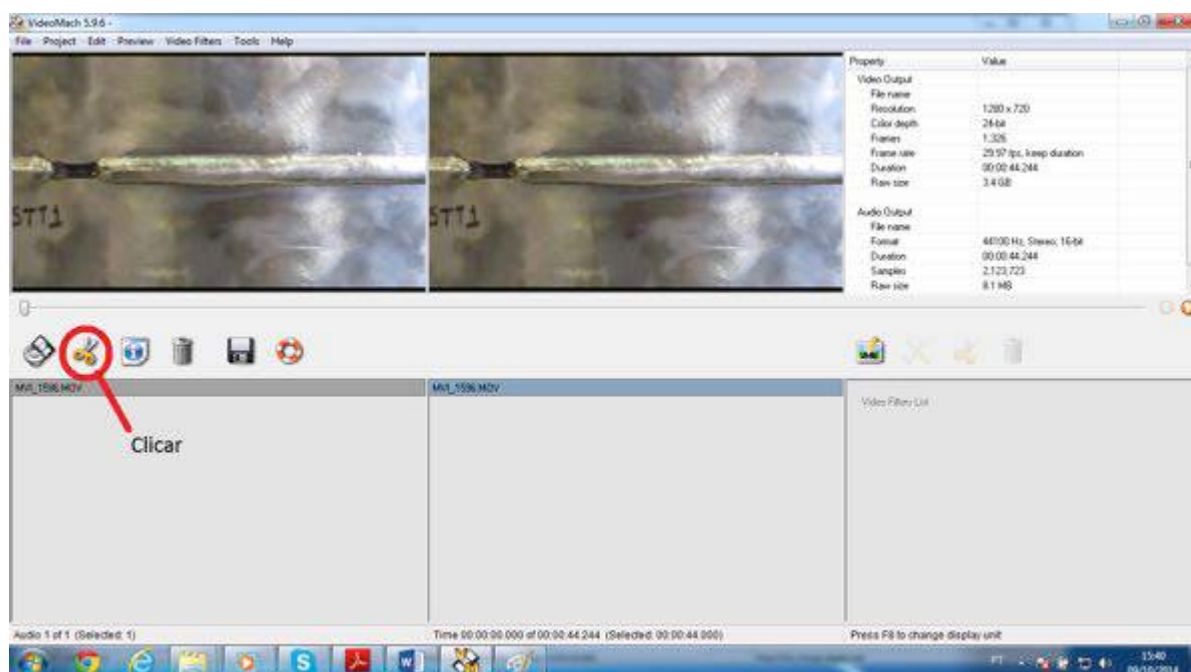


Figura C. Localização do ícone Edit In/Out Points (VideoMach®)

Na janela Edit In/Out Points centralizar o início do cordão de solda no centro do vídeo (ex.: valor 88 quadros) com o auxílio da barra de rolagem e clicar em “Mark in Point”. Com o auxílio das setas de “ajuste de quantidade de quadros” adicionar mais 30 quadros (valor 118 quadros) e clicar em “Mark out Point”. Finalizar clicando em “OK”.

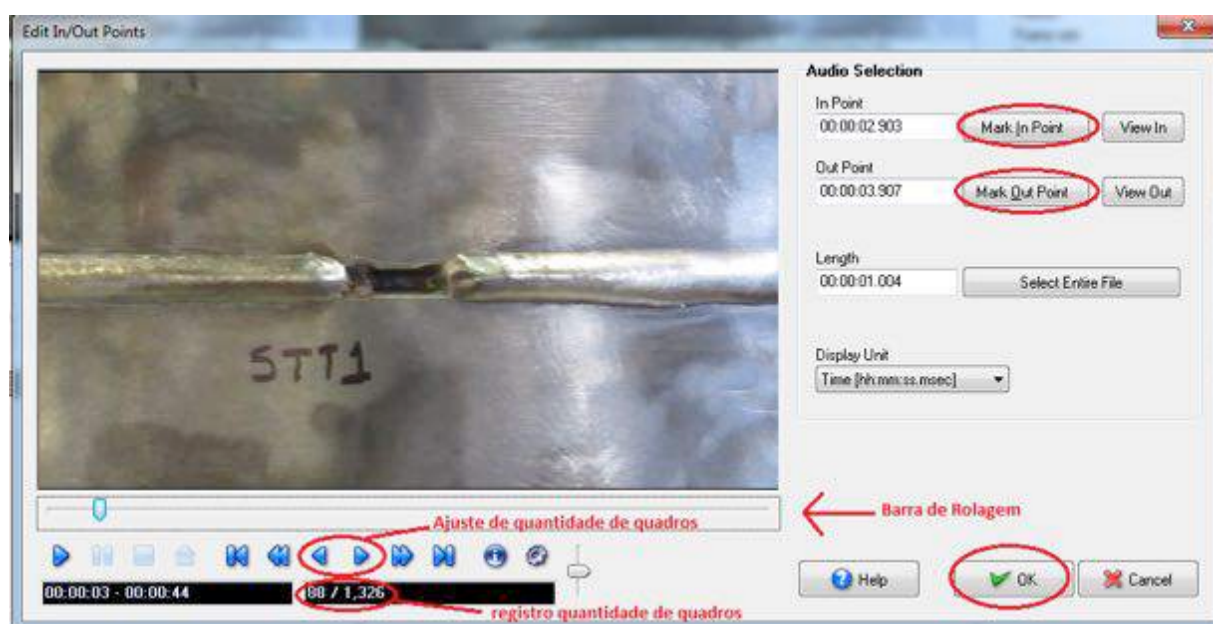


Figura D. Janela Edit In/Out Points (VideoMach®)

Logo após, clicar no ícone “save output file to disk” (Figura E) e então, será aberto uma caixa de diálogo (Figura F). Na aba “files”, subitem “write vídeo and audio to this file”, selecionar a pasta de destino para salvar as extrações das imagens. Em “output mode” selecionar a opção “Video only” para gerar apenas imagens.

Na aba “vídeo” e no campo “Frame Rate” selecionar “custom” e extrair 2 quadros por segundo.

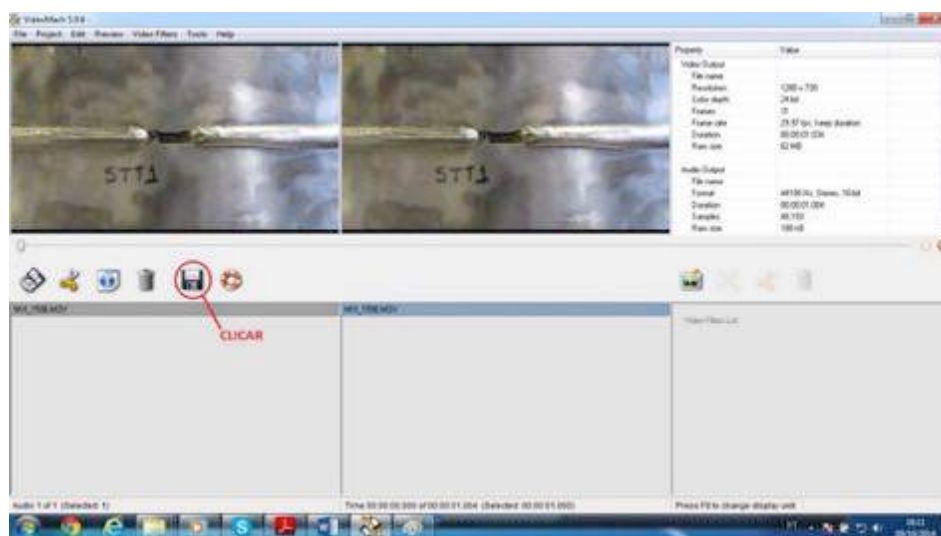


Figura E. Localização do ícone “save output file to disk” (VideoMach®)

Após clicar em start (Figura G) será salvo na pasta selecionada uma quantidade de imagens geradas em 1 segundo do vídeo.

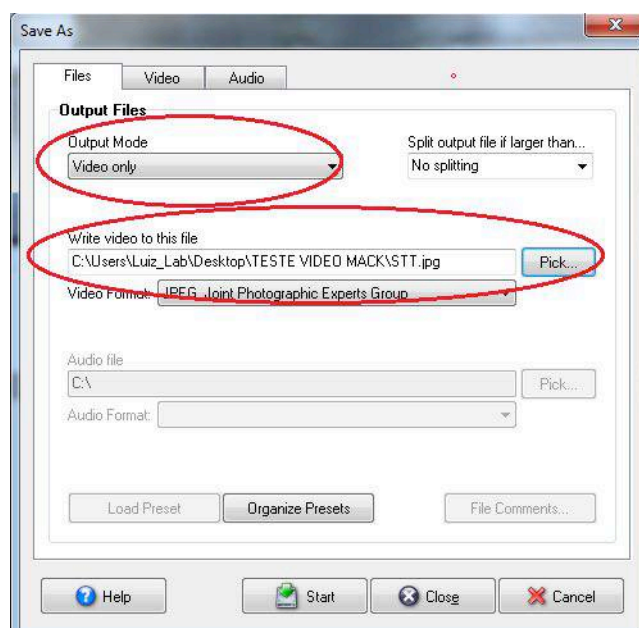


Figura F. Caixa de diálogo do procedimento de salvar (VideoMach®)

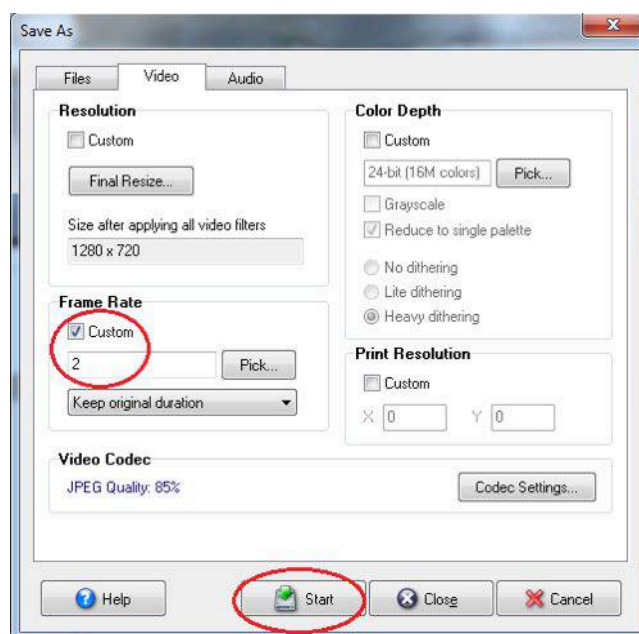


Figura G. Caixa de diálogo de ajuste do número de quadros por segundo (VideoMach®)

## **Procedimento 2: Mensuração da quantidade de pixels entre quadros consecutivos**

Neste procedimento será mensurado a quantidade de pixels deslocada em quadros consecutivos. Dessa forma, deve-se importar duas imagens consecutivas salvas no passo anterior no Software Adobe Photoshop® CS6. Este procedimento pode ser executado arrastando ambas imagens para a área de trabalho do Photoshop® ou através do menu (Arquivo->Abrir).

Na tela ambiente do Photoshop®, ir no ícone informações e ajustar a escala em “pixel” (Figura H). Para uma das imagens carregadas e com foco em um ponto referência de fácil visualização aproximar 1200%(zoom) pressionando instantaneamente as teclas **ctrl**+. No ponto escolhido realizar as leituras de (x, y) conforme mostrado na Figura J.

Adotando o mesmo ponto como referência agora para a outra imagem consecutiva, realizar o mesmo procedimento anterior para ler as coordenadas em pixels de (x, y). Durante a leitura das coordenadas para a segunda imagem certificar se o valor da coordenada “y” é o mesmo da primeira imagem.



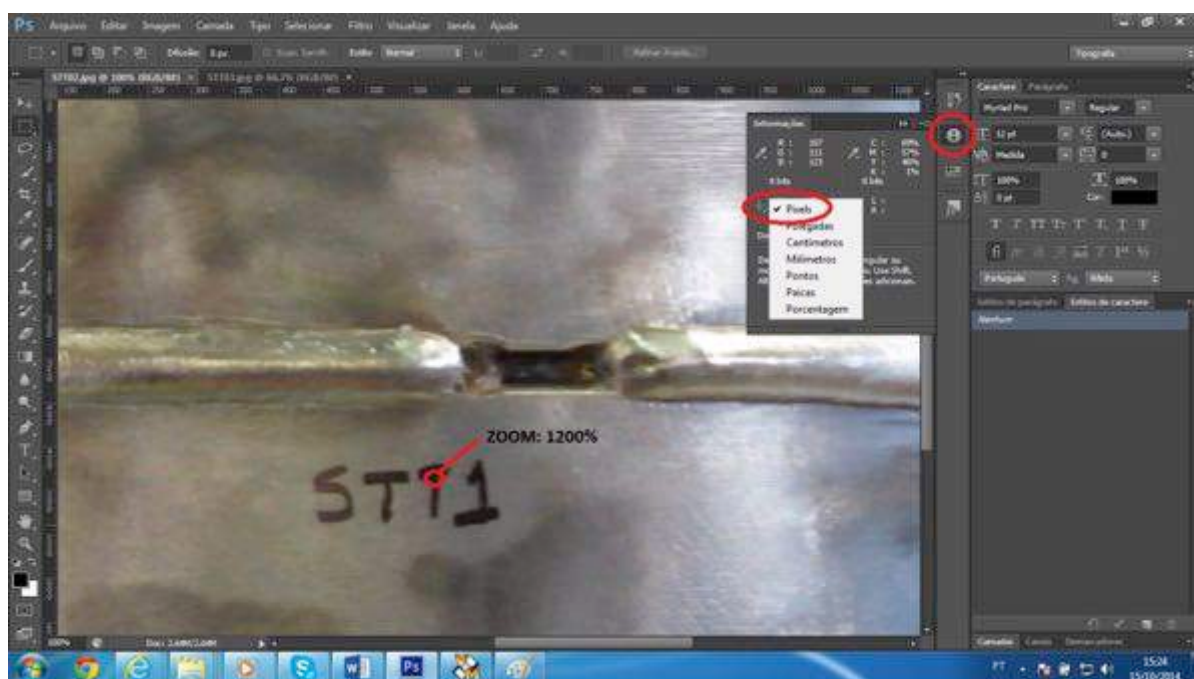


Figura H. Localização do ícone informações (Adobe Photoshop®)

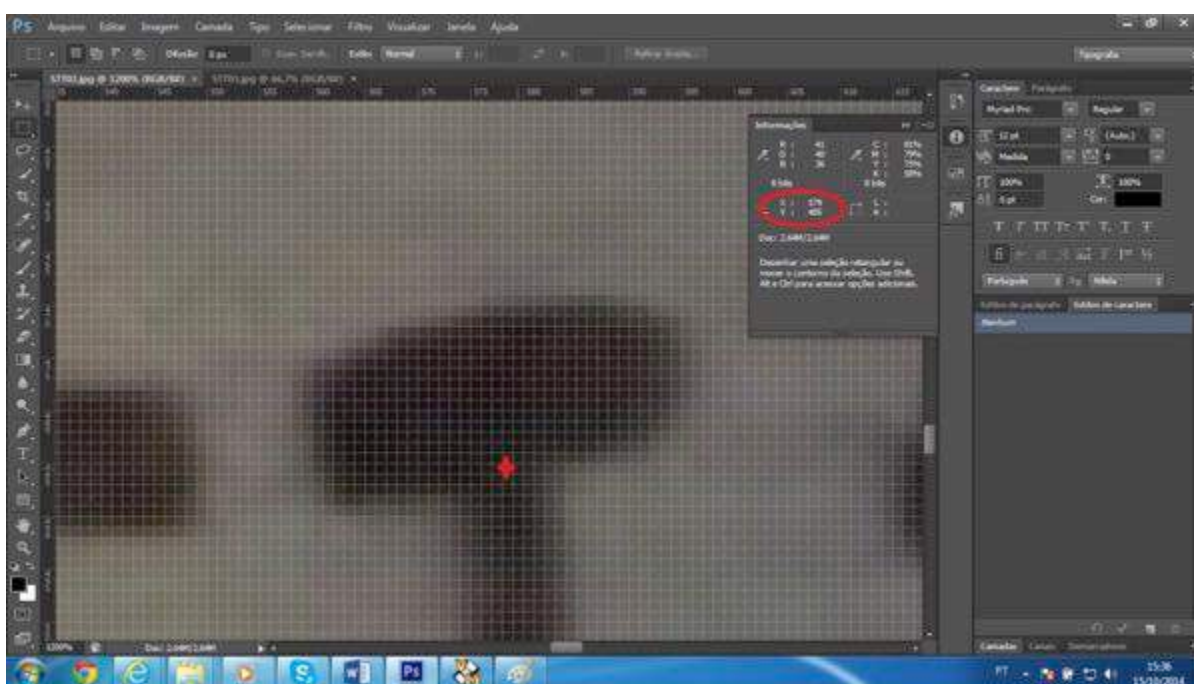


Figura J. Ambiente de leitura das coordenadas (Adobe Photoshop®)

A Tabela A mostra os valores reais de uma planificação realizada para a geração da imagem do cordão de solda (denominação do cordão: STT1).



Tabela A. Valores reais de coordenadas (cordão de solda STT1)

Imagem	X (pixels)	Y (pixels)
Imagem 1 (Enchimento)	579	485
Imagem 2 (Enchimento)	656	485
Imagem 1 (Raiz)	329	201
Imagem 2 (Raiz)	298	201

Portanto para o passe de enchimento, a diferença entre a primeira e a segunda imagem é de 78 pixels ( $656 - 578$ ) no eixo x, ou seja, a imagem deslocou-se de 78 pixels em meio segundo (2 quadros por segundo) ou 154 pixels em 1 segundo (1 quadro por segundo), quando a tubulação rotaciona com velocidade constante de 1,713 cm/s. Para as imagens do passe de raiz a diferença no eixo x é de 31 pixels ( $329 - 298$ ) em meio segundo.

Terminado este procedimento fechar todas as abas indo do Photoshop® executando o comando (Arquivo->Fechar).

### Procedimento 3: Geração de imagens dividias em fatias

Após os cálculos de deslocamento da imagem feito no procedimento 2, retornar ao software VideoMach® e clicar no ícone mostrado na Figura C (Set in/out point (“tesourinha”)). Após clicar neste ícone abrirá a janela (Figura D).

Centralizar o início do cordão de solda no centro do vídeo (ex.:valor 88 quadros) e com o auxílio da barra de rolagem, clicar em “Mark in Point”. Nas setas de “ajuste de quantidade de quadros” ou barra de rolagem percorrer até o final do cordão, centralizando o final do cordão no centro do vídeo (ex.: valor 655 quadros) e clicar em “Mark out Point”. Finalizar a tarefa clicando em “OK” (Figura L).

No ambiente principal do VideoMack®, selecionar o comando “Adjust size crop” para realizar o recorte das imagens (Figura M).

Após clicar no comando “Adjust size crop” será aberto a janela mostrada na Figura N. Este comando será utilizado para definir a largura total de cada fatia que será recortada ao longo do cordão.

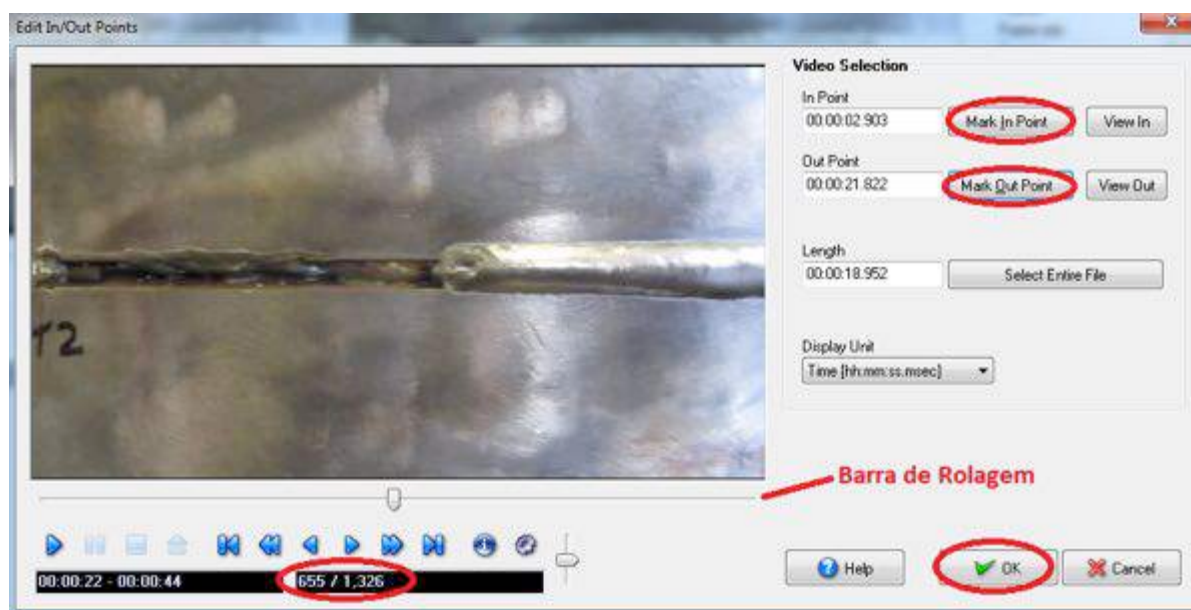


Figura L. Ambiente de ajuste do trecho do vídeo a ser planificado (VideoMach®)



Figura M. Localização do comando “Adjust size crop” (VideoMach®)

O total de pixels da tela no eixo horizontal é de 1280 para o passe de enchimento, de 640 para o passe de raiz (ver figura B) e a largura do corte de 78 e 31 pixels, respectivamente. O seguinte cálculo para inicializar o recorte no centro da tela é exibido nas Eq. A e B.

$$\text{Passe de enchimento: } (1280 - 78) / 2 = 601 \text{ (pixels)} \quad (\text{A})$$

$$\text{Passe de raiz: } (640 - 31) / 2 = 304 \text{ (pixels)} \quad (\text{B})$$

Portanto, no campo “Left” e “Right” no ícone Crop (in pixels), apresentado na Figura N, digitar o valor 601 para o passe de enchimento e 304 para o passe de raiz e em seguida clicar em “Ok”. Verificar que será mostrado no centro da Figura N duas linhas delimitando o local fixo e a largura das imagens que serão recortadas com o decorrer do vídeo.



Figura N. Localização dos campos de ajuste do Crop (VideoMach®)

Logo após, clicar no ícone “save output file to disk” (Figura P). Observe na Figura P que é mostrado o tamanho real das fotos que serão extraídas. Após este procedimento será aberto uma outra janela conforme mostra a Figura F. Na aba “files”, caixa de diálogo “write vídeo and audio to this file”, selecionar a pasta para salvar as extrações das imagens. Lembre de nomear o arquivo (Ex. STT). Em “output mode” selecionar a opção “Video only” para realização apenas do corte das imagens, excluindo qualquer trabalho com o áudio do vídeo.

Na aba “vídeo” e no campo “Frame Rate” selecionar “custom” e extrair 2 quadros por segundo. Após clicar em start (Figura G) serão salvos na pasta selecionada no campo “write vídeo and audio to this file” várias imagens com a largura selecionada, varrendo toda a extensão do cordão (Figura L).

Na Figura Q são mostradas para o cordão STT1 as fotos recortadas com o auxílio do VideoMach®.

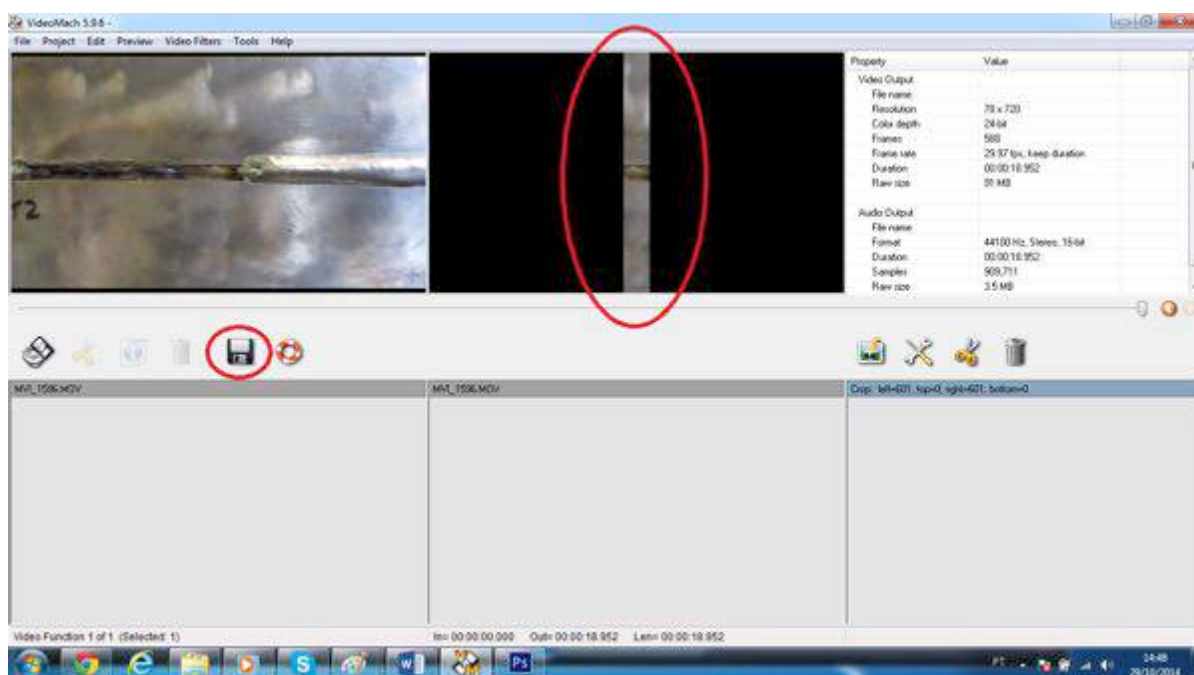


Figura P. Tamanho real das fatias ajustadas (VideoMach®)



Figura Q. Detalhe das fotos recortadas pelo software VideoMach® da filmagem (cordão STT1)

Portanto para este exemplo, no passe de enchimento tem-se 38 quadros com 78 pixels de largura contabilizando o total de 2926 pixels (38pixelsx78pixels). Lembrando que

os 38 quadros variam de filmagem para filmagem. Para o passe de raiz ter-se-á 31 pixels e a quantidade de quadros também irá variar com a filmagem.

A seguir é mostrado o procedimento exemplo para unir os quadros para o passe de enchimento. O procedimento para unir os quadros no passe de raiz é o mesmo.

#### **Procedimento 4: Unindo as imagens geradas pelo VideoMach® no Adobe Photoshop®**

Iniciar o software Photoshop®, ir em Arquivo ->Novo ou pressionar ctrl+N.

O Photoshop® abrirá a tela mostrada na Figura R. Nesta tela preencher os campos Nome, Largura e Altura com os seguintes dados:

Nome: STT1

Largura: 2964 Pixels (38pixelsx78pixels)

Altura: 720 Pixels (ver figura B)

Após o término do preenchimento clicar em “Ok”. Logo após, será aberto o campo de trabalho com 2926 pixels no eixo horizontal e 720 pixels no eixo vertical correspondente ao tamanho da foto final (Figura S).

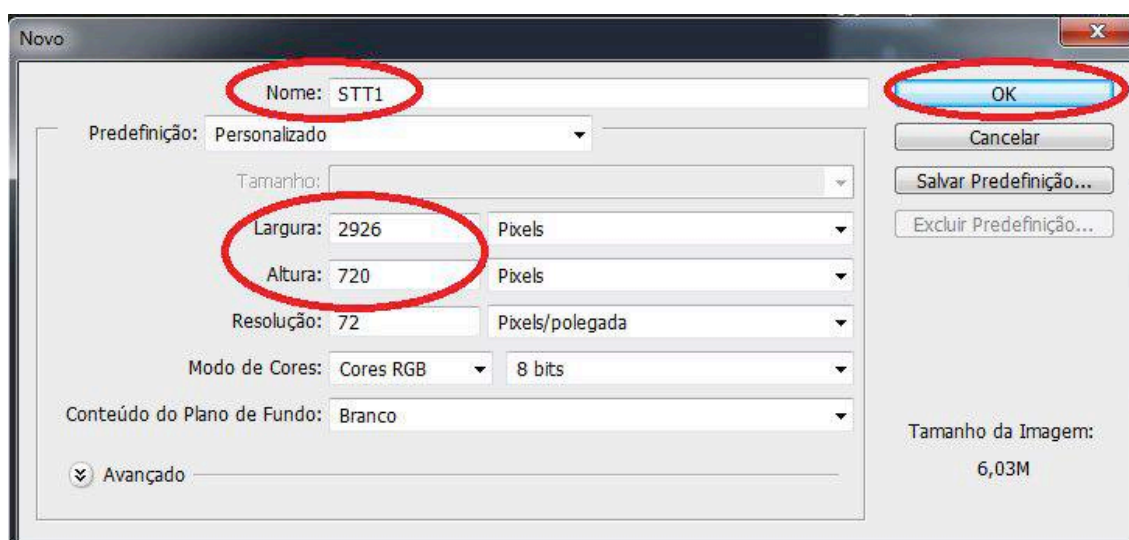


Figura R. Tela de ajuste de largura e altura do campo de trabalho (Adobe Photoshop®)

Observação: O valor de altura é particular de cada conjunto de fatias. Para o passe de raiz foi utilizado o valor de 480 (Figura B) de altura.

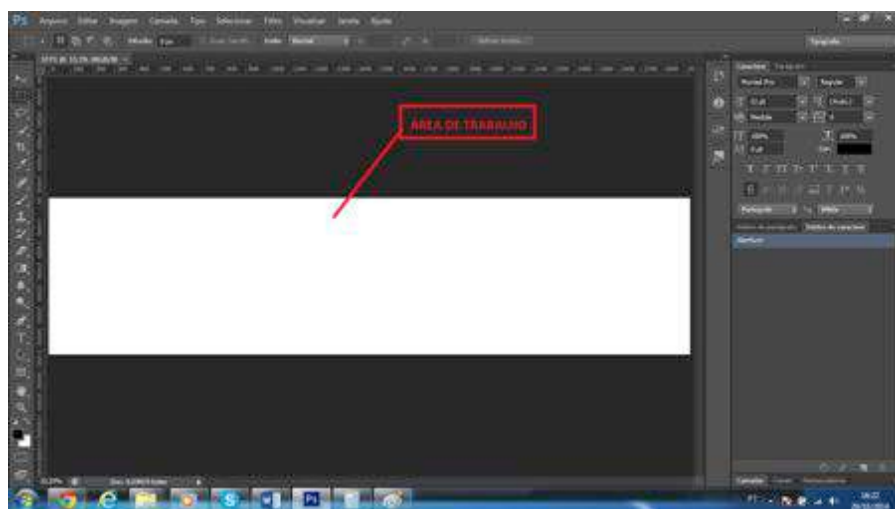


Figura S. Campo de trabalho correspondente ao tamanho da foto final (Adobe Photoshop®)

Selecionar todos os arquivos mostrados na Figura Q e arrastar para a área de trabalho do Adobe Photoshop® (Figura S). Após este procedimento note que o primeiro quadro recortado pelo VideoMach® é mostrado no centro do vídeo (Figura T). Manter pressionado o botão esquerdo do mouse e arrastar este quadro da esquerda para a direita, uma vez que, o tubo foi filmado girando da esquerda para a direita.

Após posicionar o primeiro quadro no local desejado, pressionar “Enter” no teclado ou clicar no ícone mostrado (Figura U). Ao pressionar “Enter” o segundo quadro é mostrado no centro da área de trabalho, arraste-o posicionando ao lado do quadro anterior. Posicionar todos os quadros em sequência até formar a imagem completa do cordão de solda planejado (Figura V).

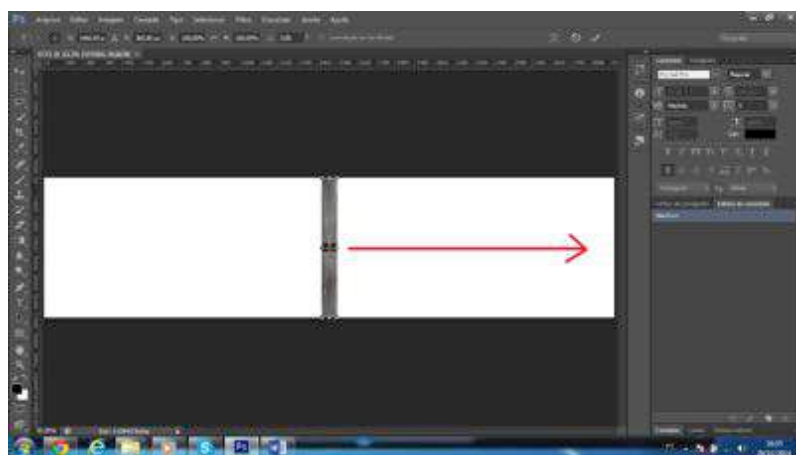


Figura T. Posicionamento da primeira imagem recortada pelo VideoMach® (Adobe Photoshop®)



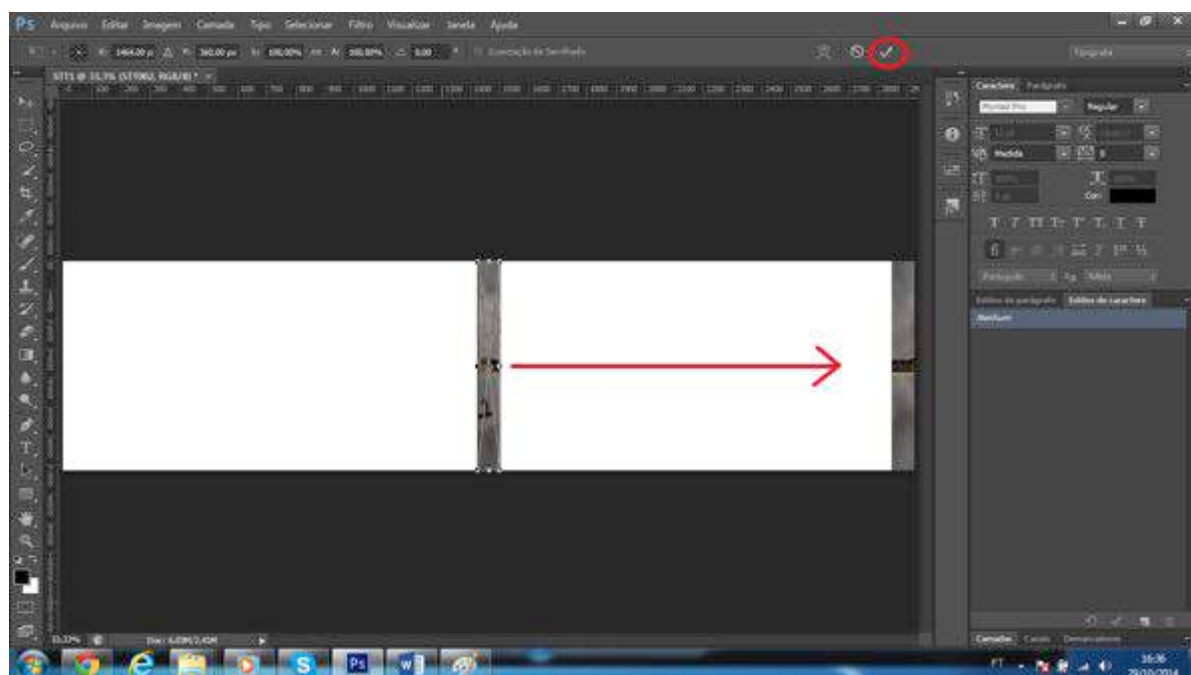


Figura U. Posicionamento da primeira e segunda imagem recortada pelo VideoMach® (Adobe Photoshop®)

Após este procedimento utilizar o comando “achatar imagem” ou “Flatten Image” para posicionar todas as imagens no mesmo plano.

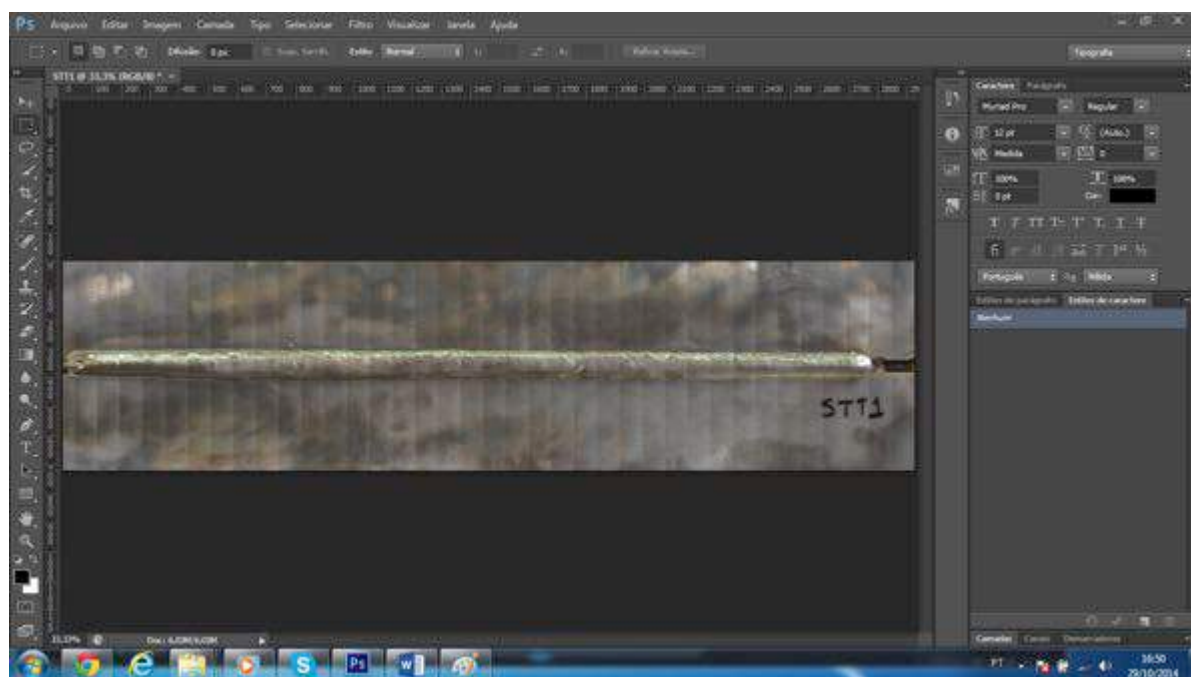


Figura V. Posicionamento de todas as fotos fatiadas pelo software VideoMach® (Adobe Photoshop®)

Salvar a imagem executando o comando “Salvar como”. Após selecionar a pasta e o nome da imagem, clicar em “ok”. Logo em seguida aparecerá a janela mostrada na Figura X. É recomendado salvar a imagem em JPEG e selecionar a qualidade máxima proporcionada pelo Adobe Photoshop®, no caso, qualidade 12.

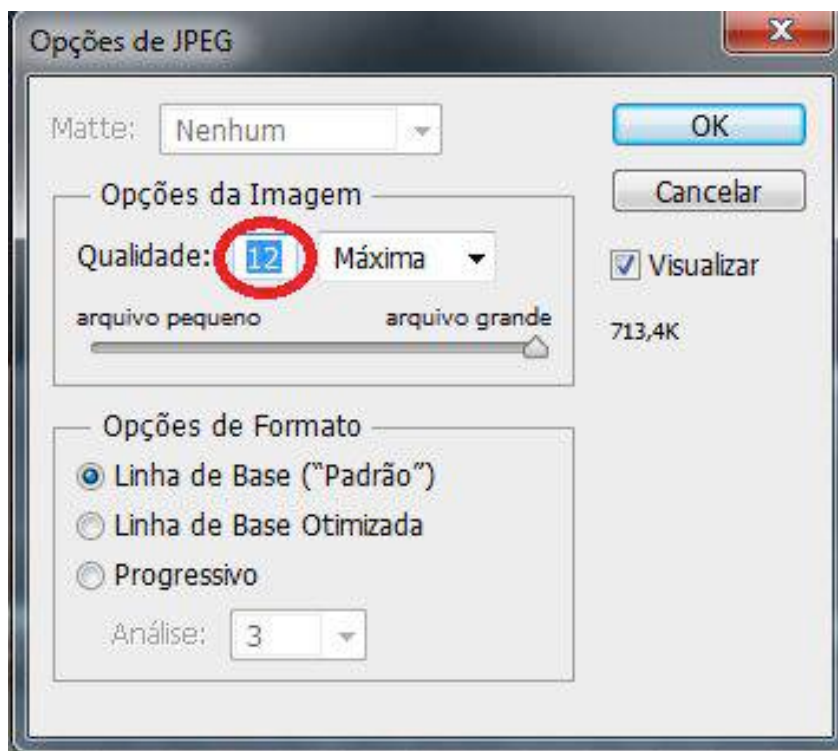


Figura X. Tela de seleção da qualidade de salvamento da imagem (Adobe Photoshop®)

Para girar a imagem de 90 graus de forma a representar o sentido de soldagem do cordão, executar o comando (Imagem->Rotação de imagem->90 Anti-horário) no programa Adobe Photoshop®. A imagem final é mostrada na Figura Y.



Figura Y. Imagem final do cordão de solda planificado

## APÊNDICE VIII

### Ensaio Preliminares com Câmera Termográfica: Gráficos

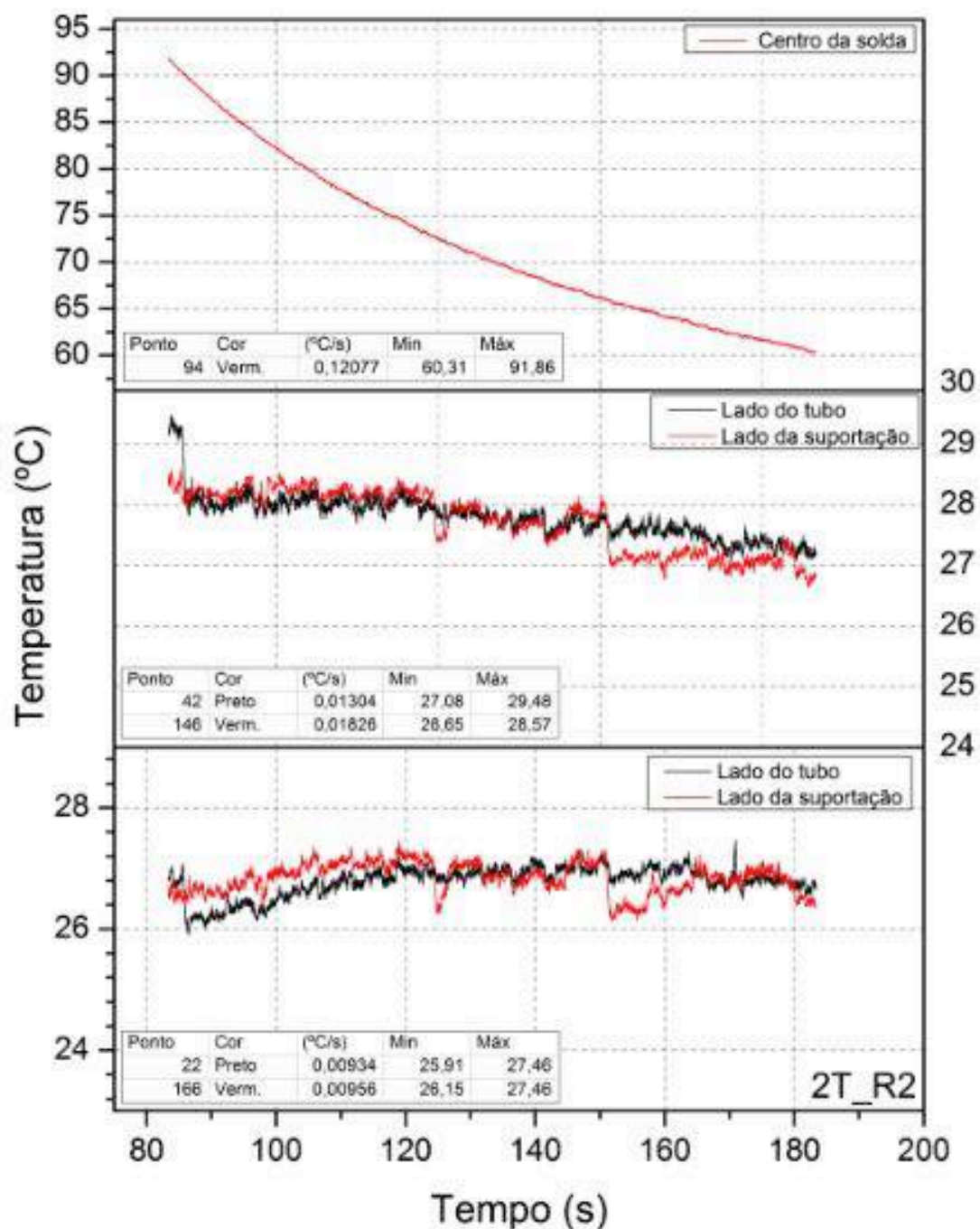


Figura 8.1 Gráficos (temperatura x tempo) de pontos simétricos, localizado no duto formado com 2 mangas (tubos), quando executado cordão de solda de passa de raiz com o processo derivativo (STT) (ensaio 2T\_R2)

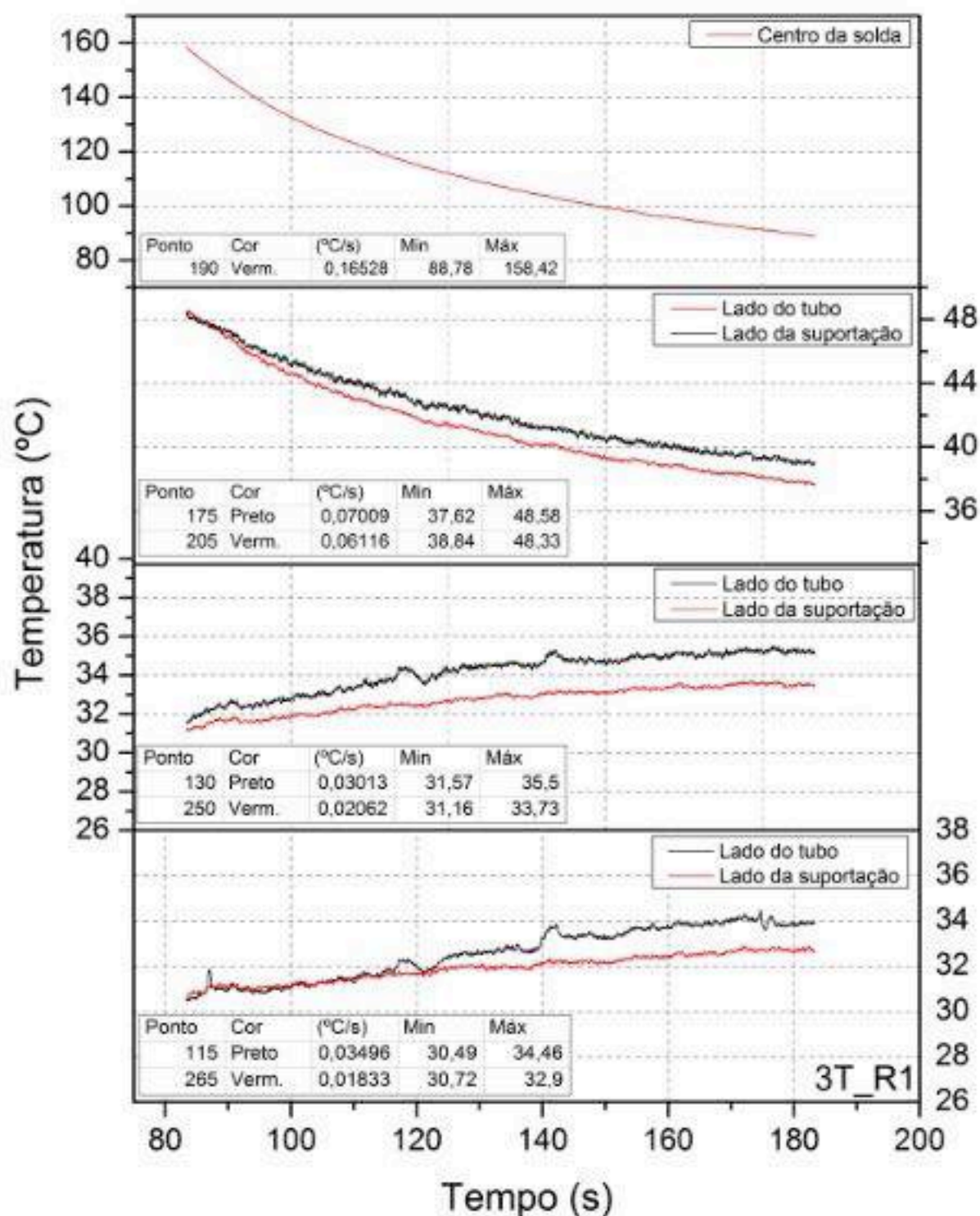


Figura 8.2 Gráficos (temperatura x tempo) de pontos simétricos, localizado no duto formado com 3 mangas (tubos), quando executado cordão de solda de passa de raiz com o processo derivativo (STT) (ensaio 3T\_R1)



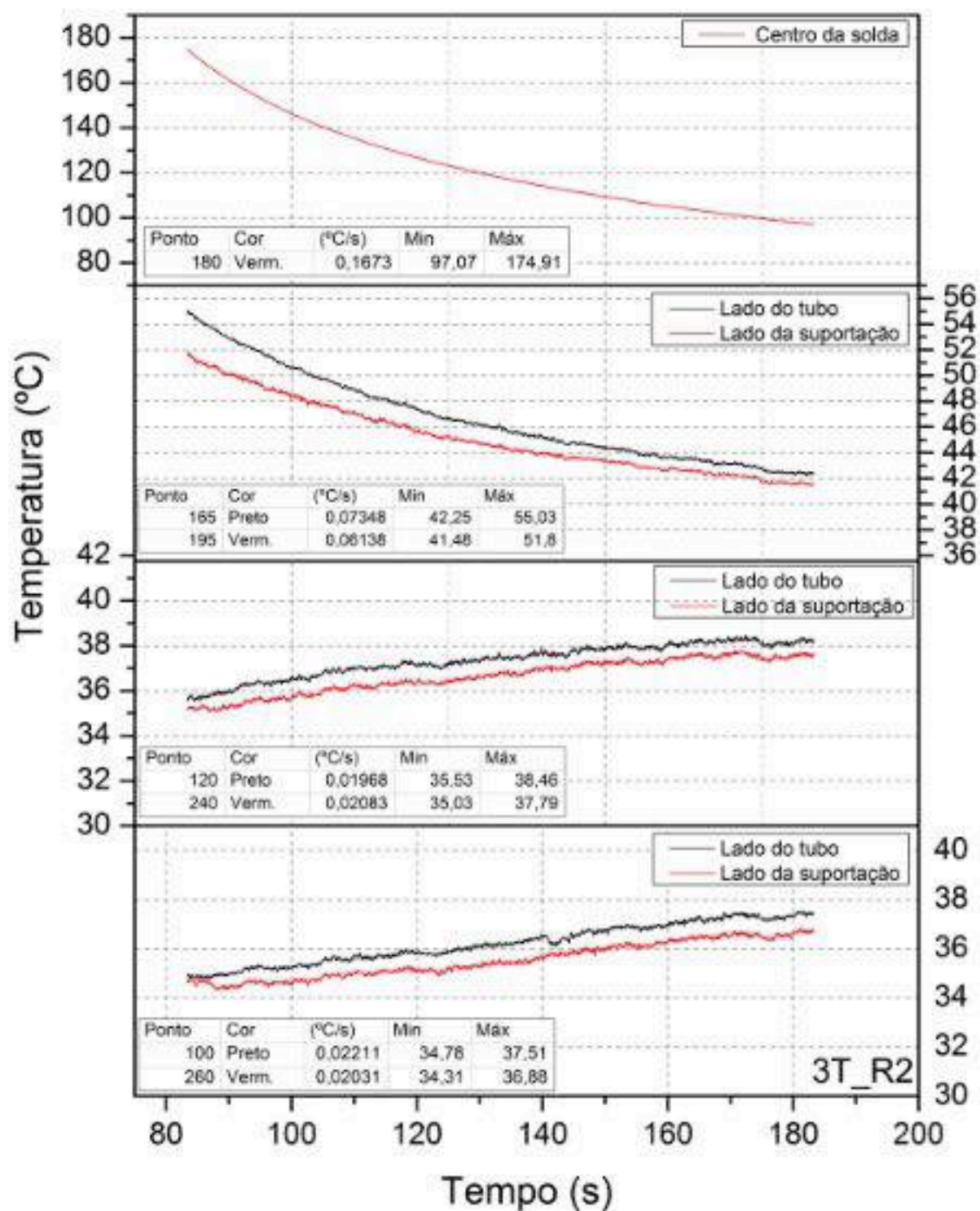


Figura 8.3 Gráficos (temperatura x tempo) de pontos simétricos, localizado no duto formado com 3 mangas (tubos), quando executado cordão de solda de passa de raiz com o processo derivativo (STT) (ensaio 3T\_R2)



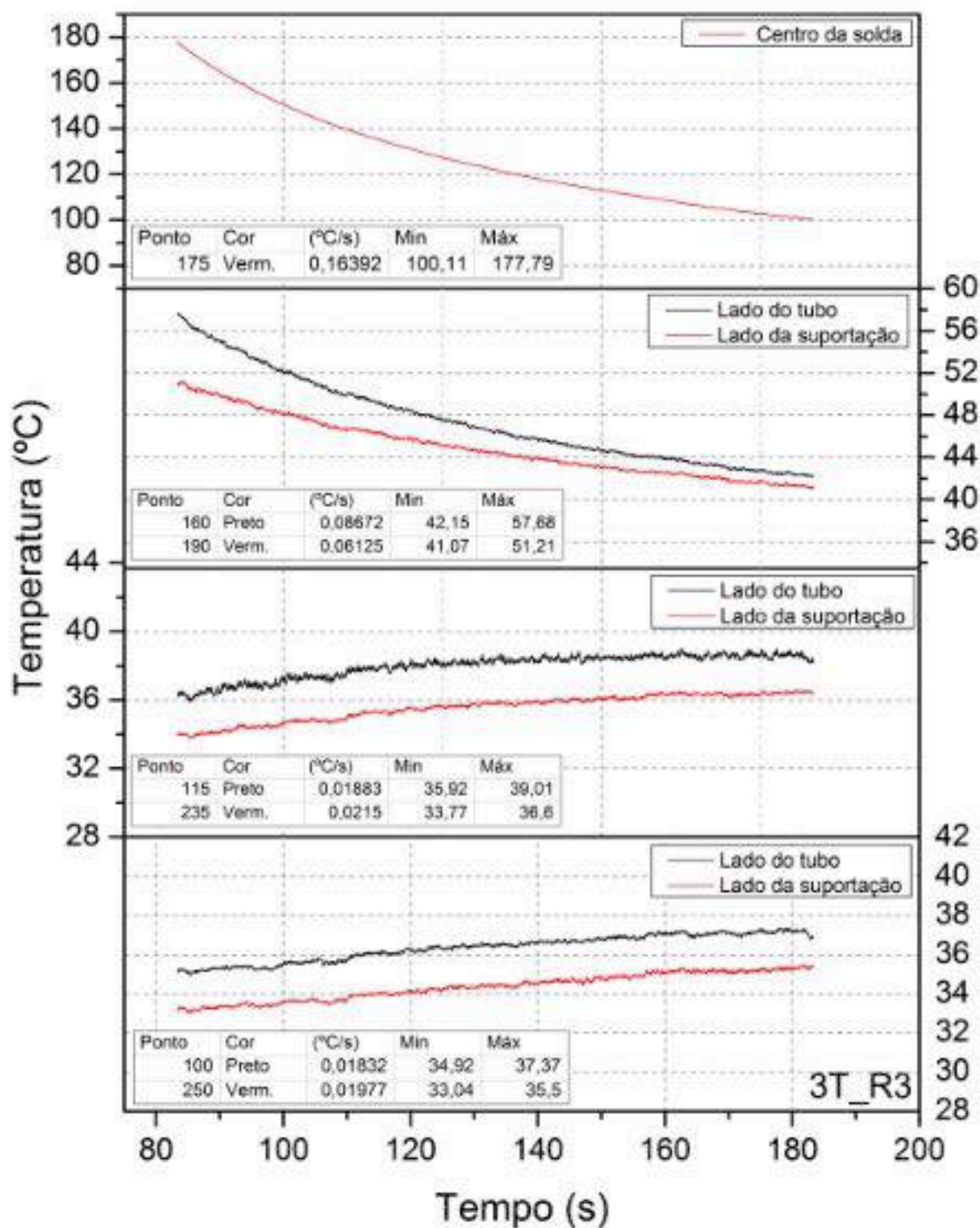


Figura 8.4 Gráficos (temperatura x tempo) de pontos simétricos, localizado no duto formado com 3 mangas (tubos), quando executado cordão de solda de passa de raiz com o processo derivativo (STT) (ensaio 3T\_R3)

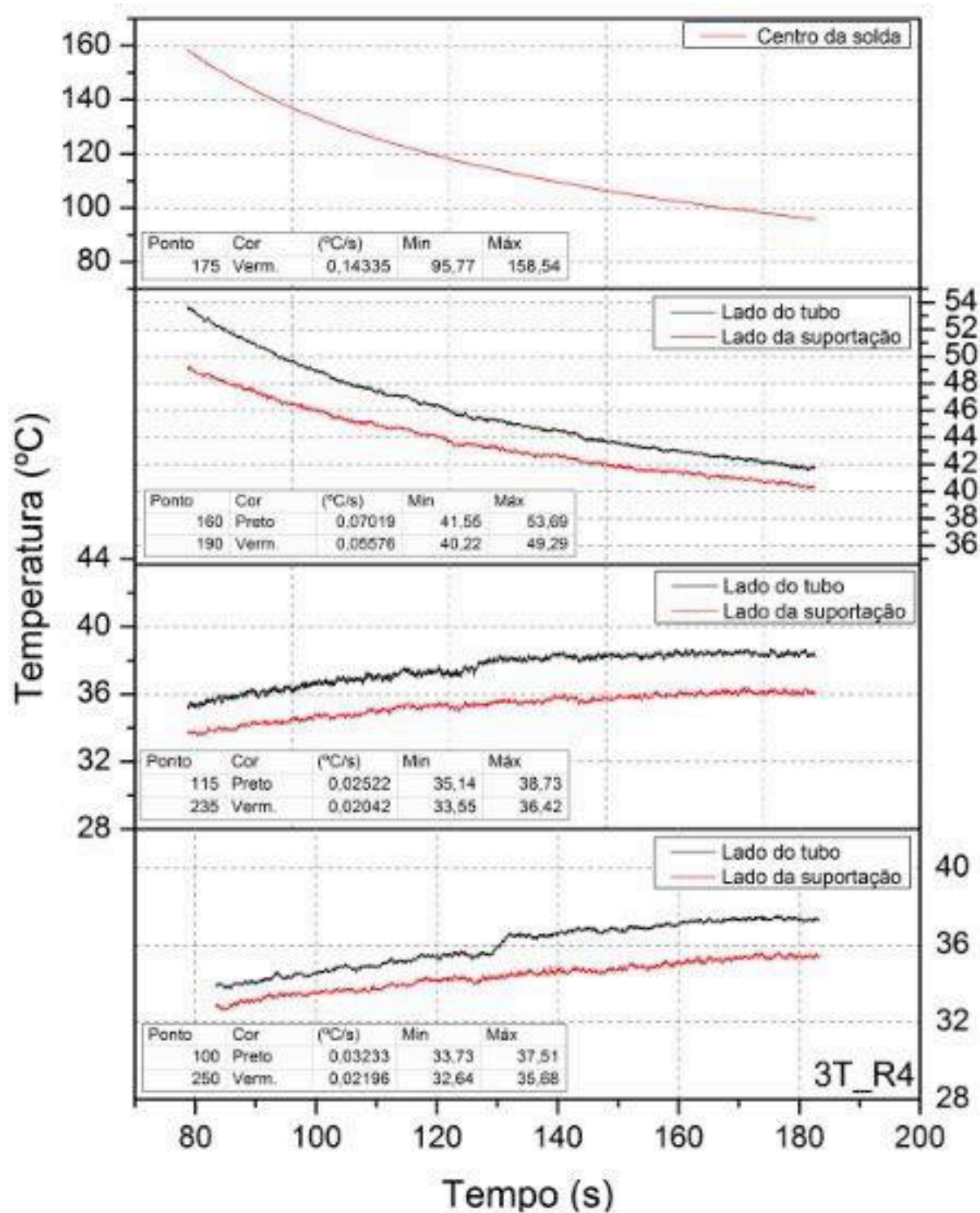


Figura 8.5 Gráficos (temperatura x tempo) de pontos simétricos, localizado no duto formado com 3 mangas (tubos), quando executado cordão de solda de passa de raiz com o processo derivativo (STT) (ensaio 3T\_R4)

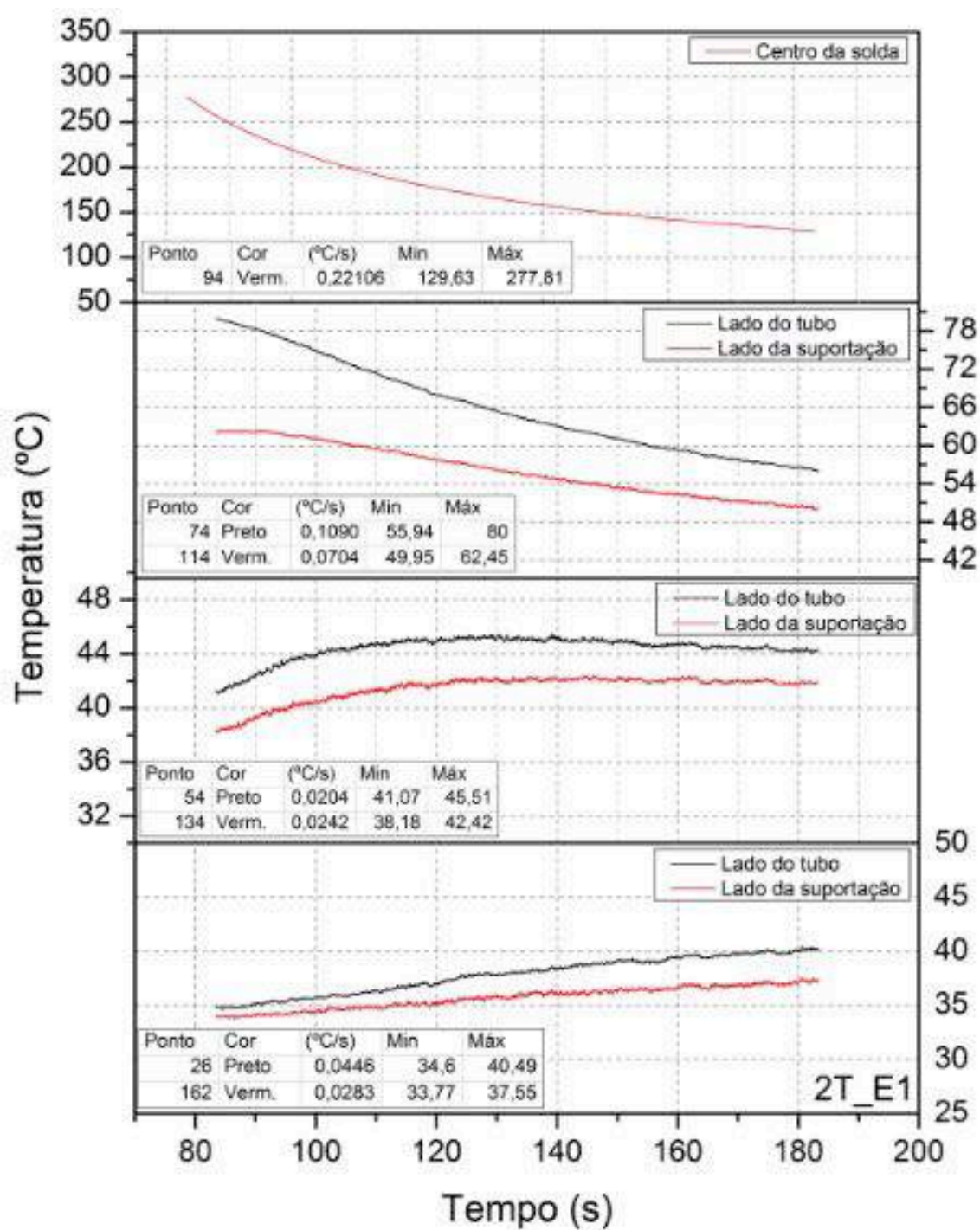


Figura 8.6 Gráficos (temperatura x tempo) de pontos simétricos, localizado no duto formado com 2 mangas (tubos), quando executado cordão de solda de passa de enchimento com o processo derivativo (STT) (ensaio 2T\_E1)



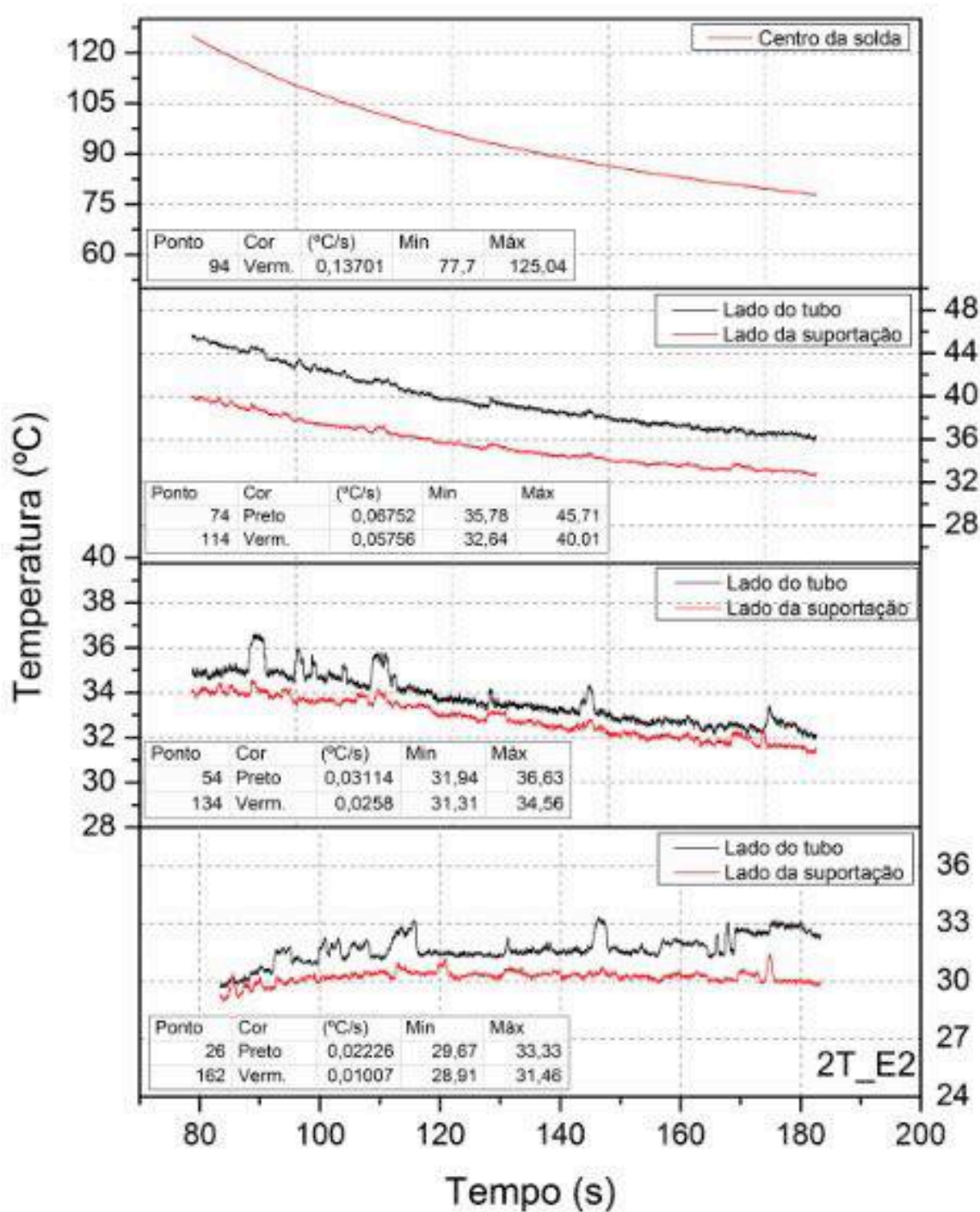


Figura 8.7 Gráficos (temperatura x tempo) de pontos simétricos, localizado no duto formado com 2 mangas (tubos), quando executado cordão de solda de passa de enchimento com o processo derivativo (STT) (ensaio 2T\_E2)

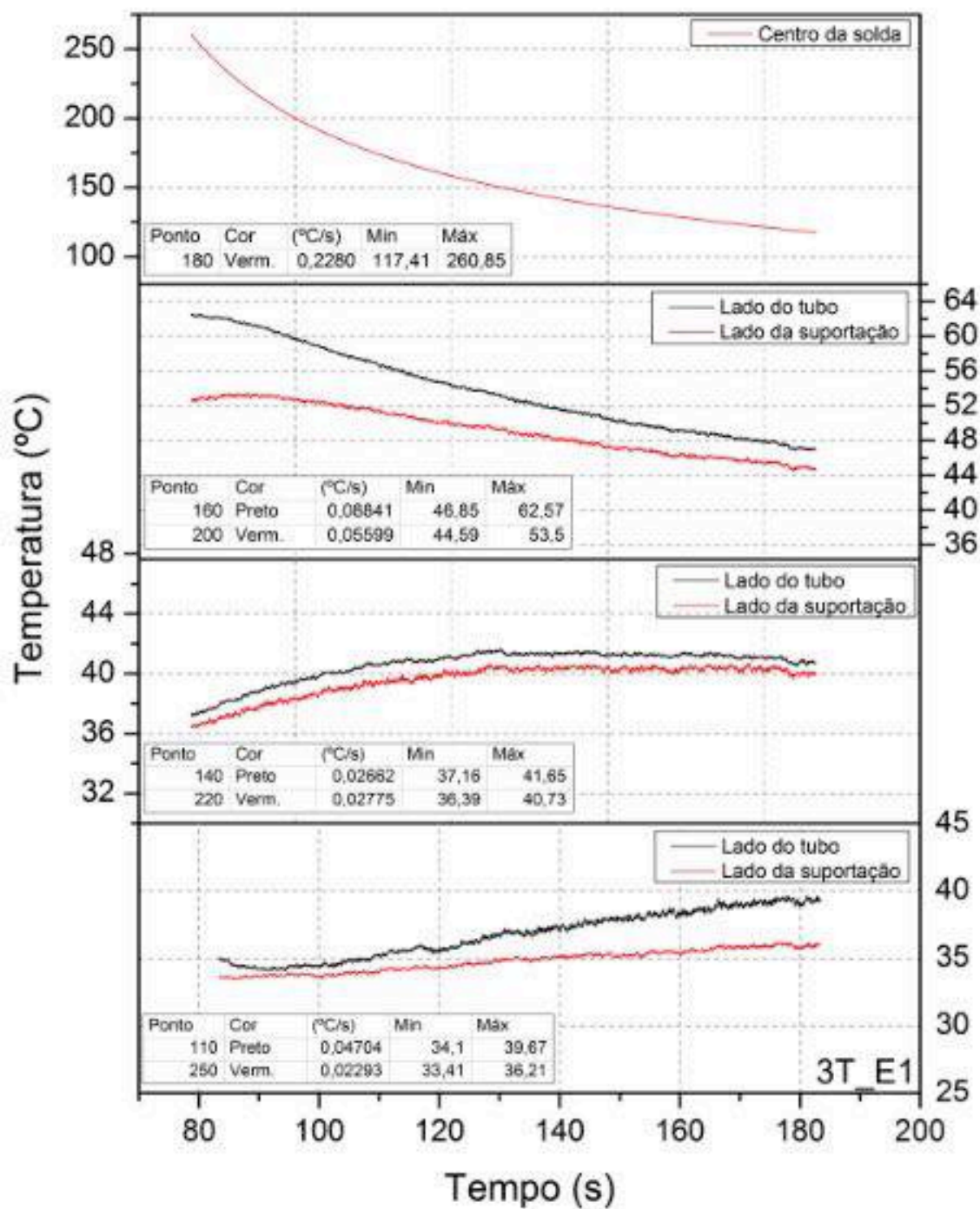


Figura 8.8 Gráficos (temperatura x tempo) de pontos simétricos, localizado no duto formado com 3 mangas (tubos), quando executado cordão de solda de passa de enchimento com o processo derivativo (STT) (ensaio 3T\_E1)

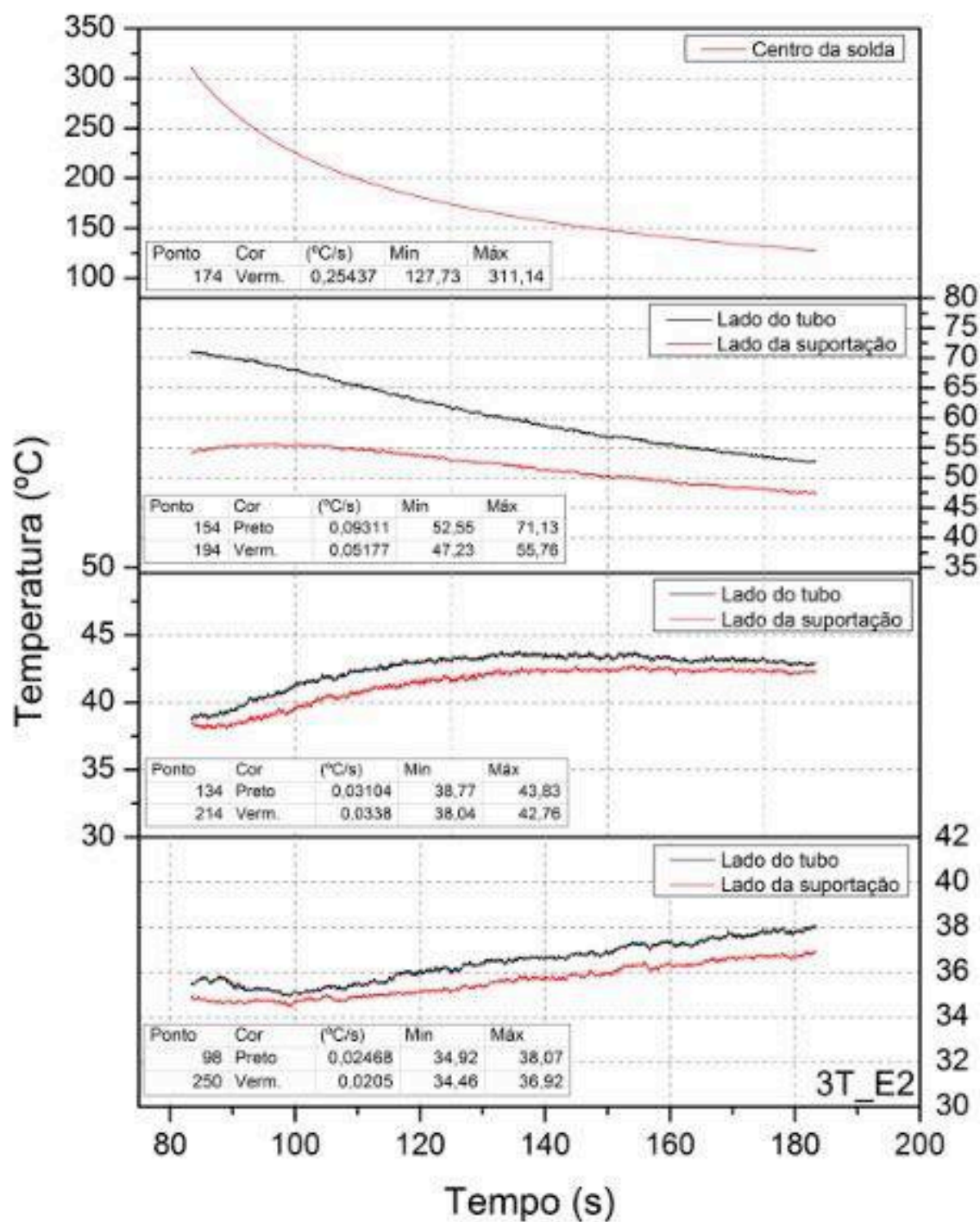


Figura 8.9 Gráficos (temperatura x tempo) de pontos simétricos, localizado no duto formado com 3 mangas (tubos), quando executado cordão de solda de passa de enchimento com o processo derivativo (STT) (ensaio 3T\_E2)



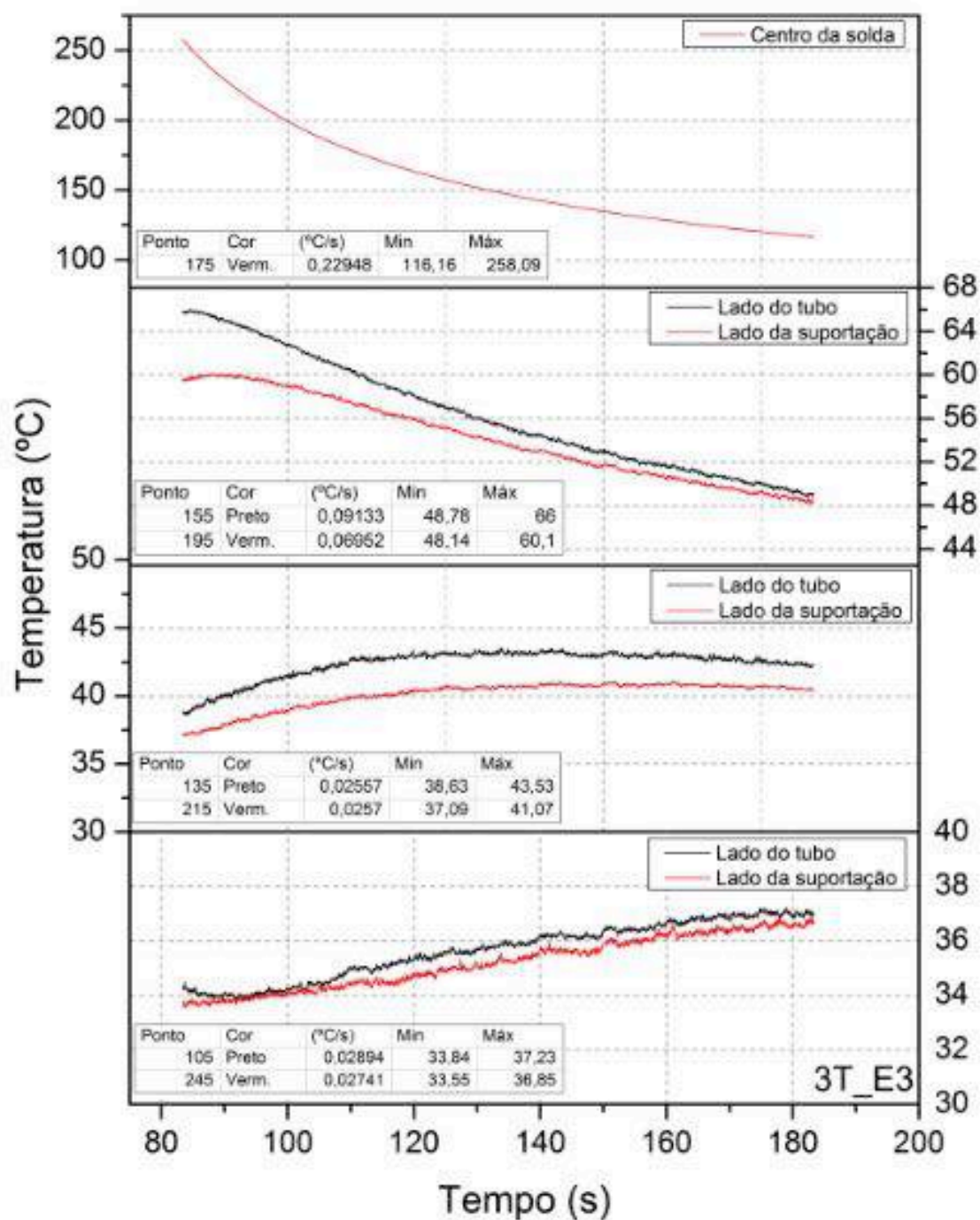


Figura 8.10 Gráficos (temperatura x tempo) de pontos simétricos, localizado no duto formado com 3 mangas (tubos), quando executado cordão de solda de passa de enchimento com o processo derivativo (STT) (ensaio 3T\_E3)

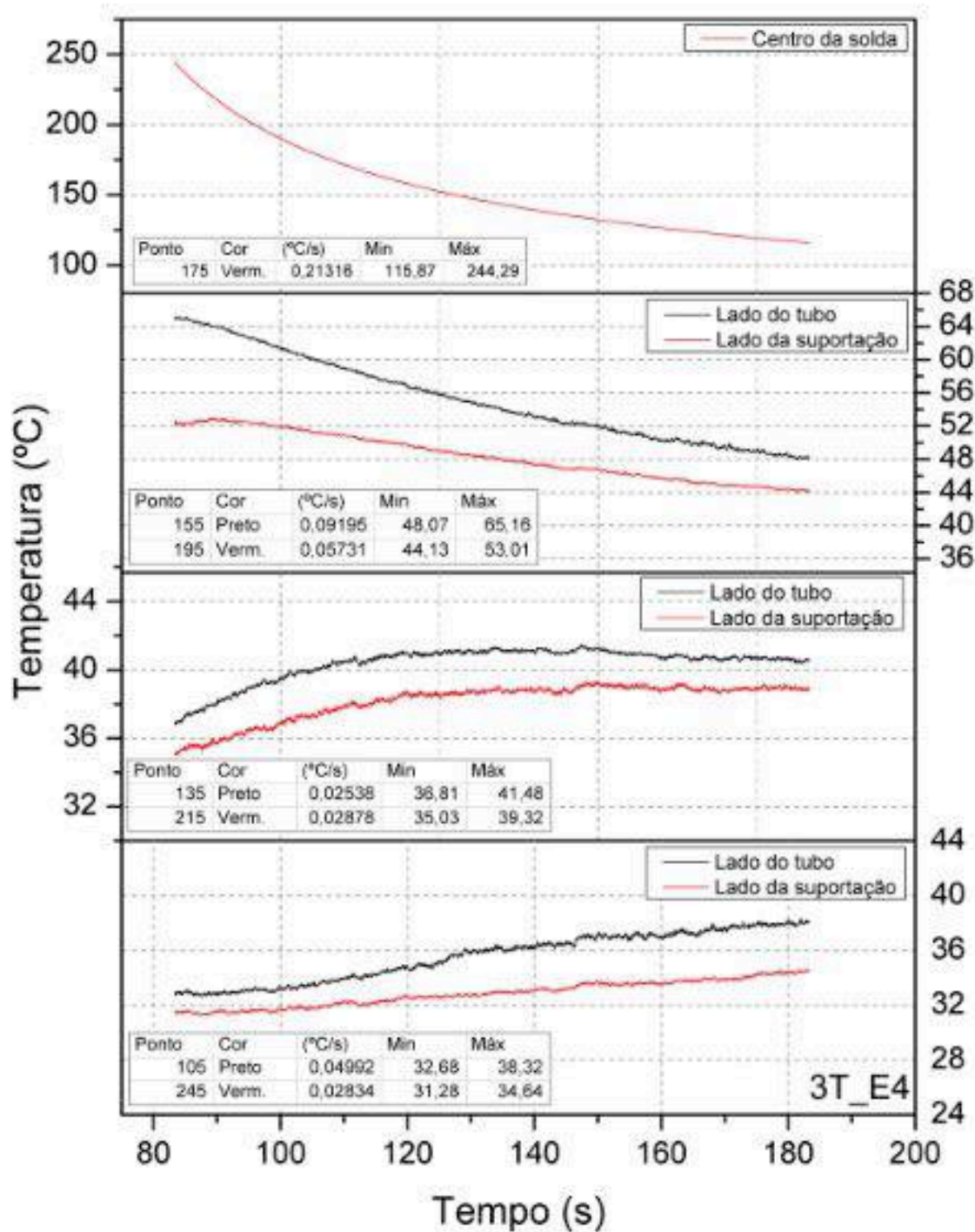


Figura 8.11 Gráficos (temperatura x tempo) de pontos simétricos, localizado no duto formado com 3 mangas (tubos), quando executado cordão de solda de passa de enchimento com o processo derivativo (STT) (ensaio 3T\_E4)

## APÊNDICE IX

### Oscilogramas: Soldas Seleccionadas para Análise Macrográfica (Processo de Soldagem Convencional)

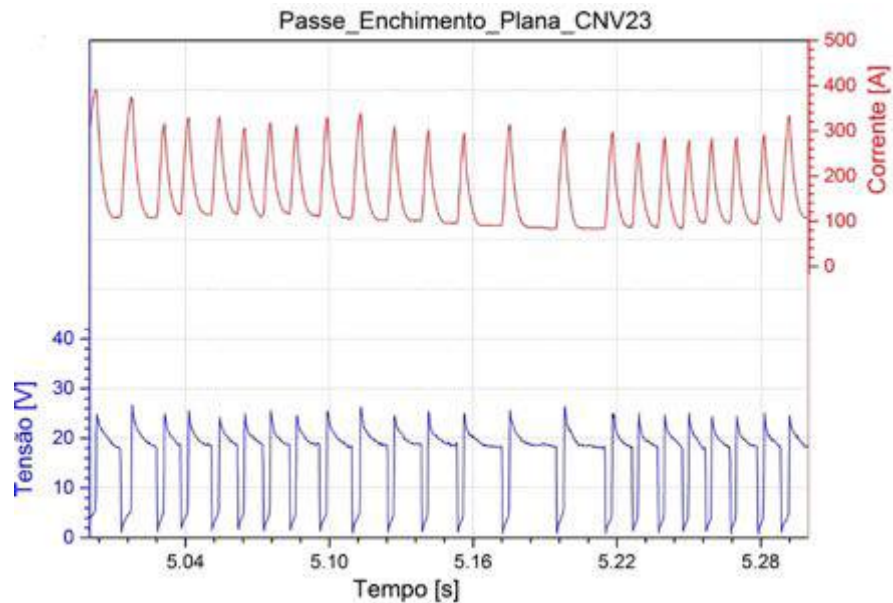


Figura 9.1. Oscilograma da posição plana em função do passe de enchimento executado com o processo convencional (Teste 11)

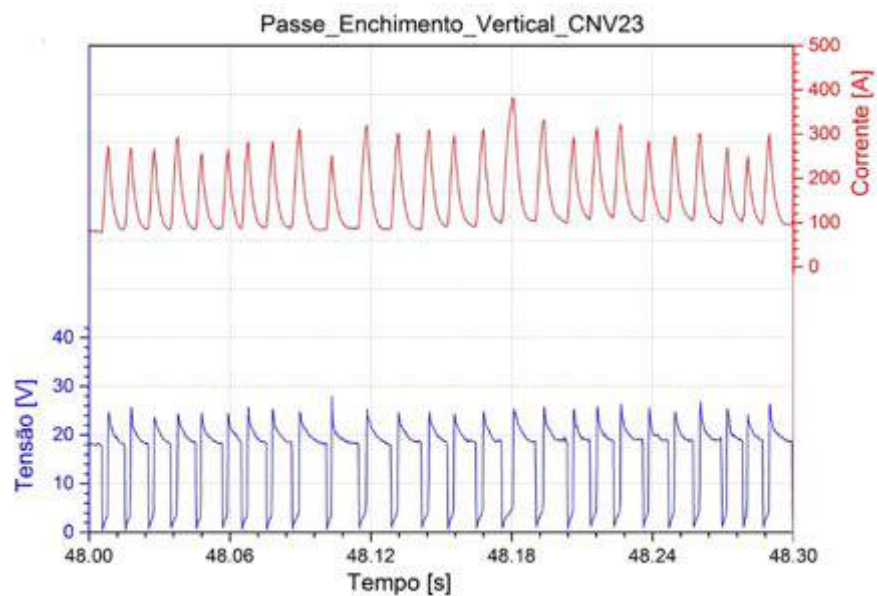


Figura 9.2. Oscilograma da posição vertical em função do passe de enchimento executado com o processo convencional (Teste 11)

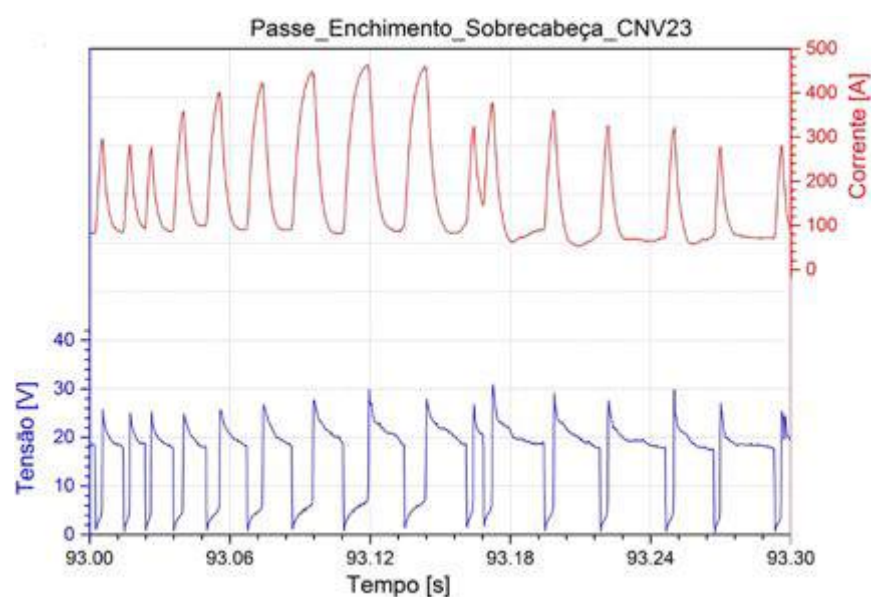


Figura 9.3. Oscilograma da posição sobrecabeça em função do passe de enchimento executado com o processo convencional (Teste 11)

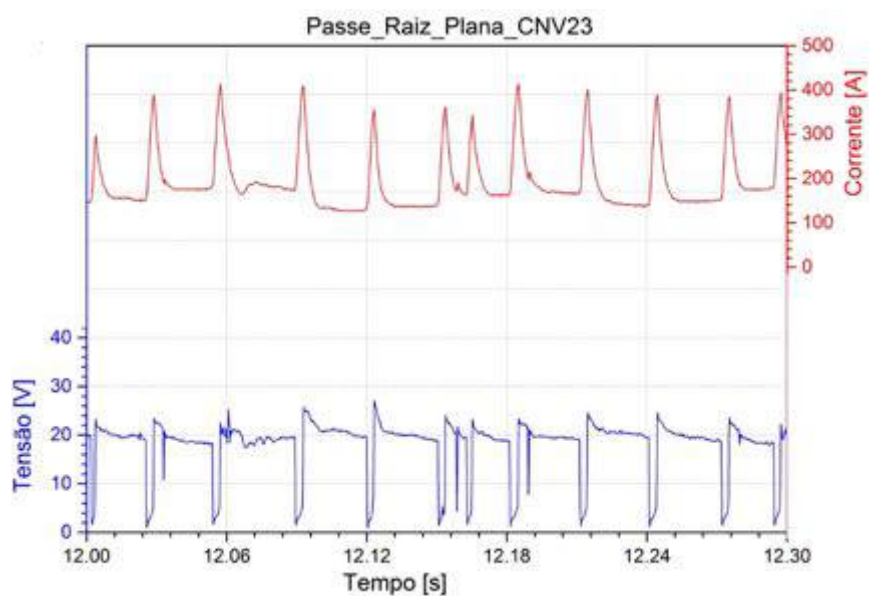


Figura 9.4. Oscilograma da posição plana em função do passe de raiz executado com o processo convencional (Teste 11)

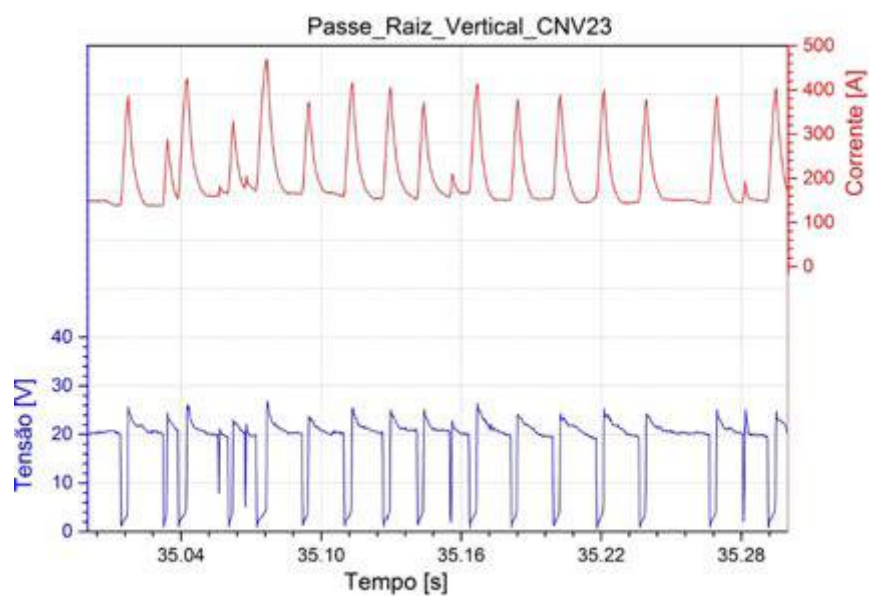


Figura 9.5. Oscilograma da posição vertical em função do passe de raiz executado com o processo convencional (Teste 11)

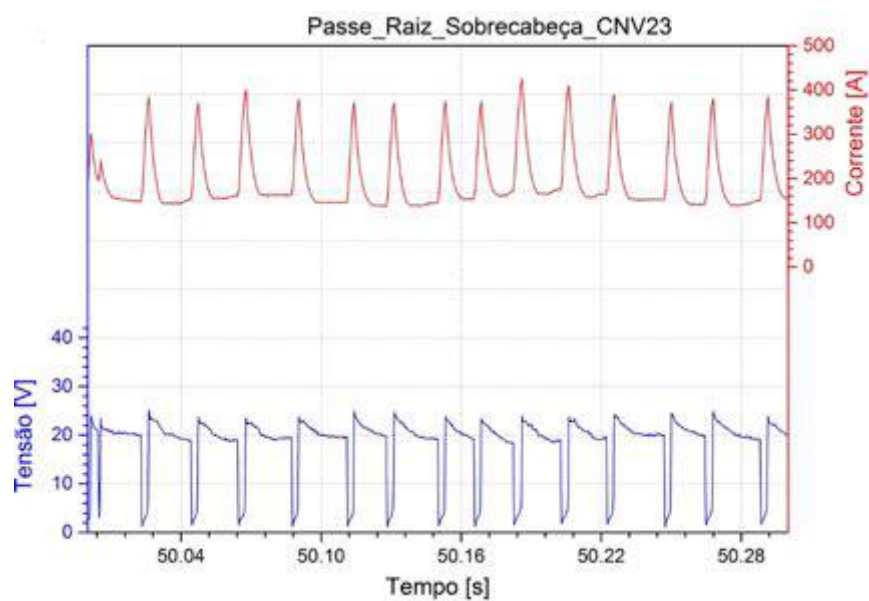


Figura 9.6. Oscilograma da posição sobrecabeça em função do passe de raiz executado com o processo convencional (Teste 11)



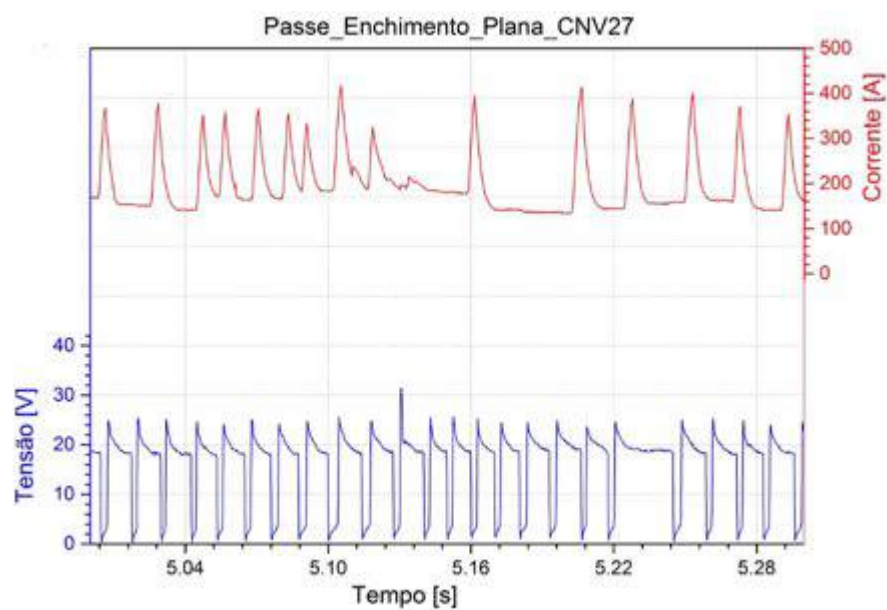


Figura 9.7. Oscilograma da posição plana em função do passe de enchimento executado com o processo convencional (Teste 13)

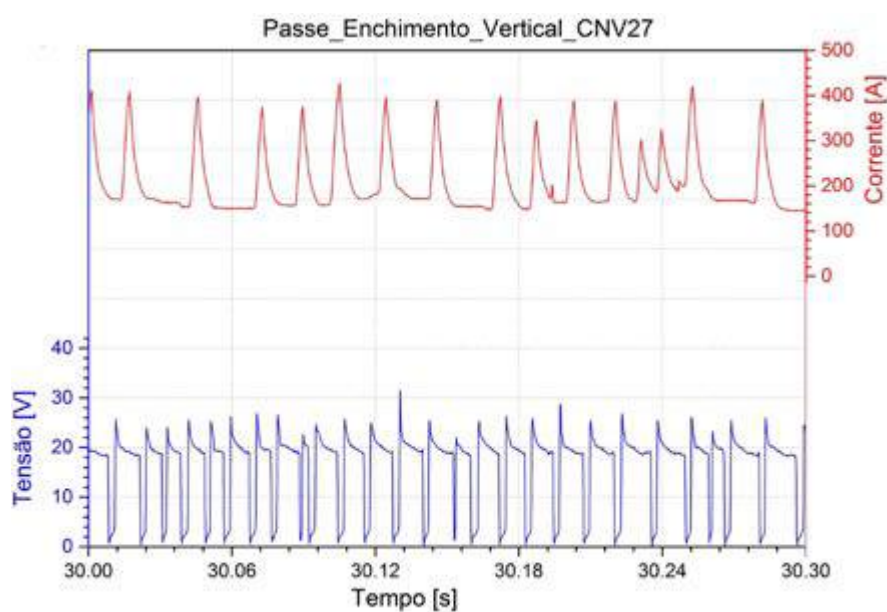


Figura 9.8. Oscilograma da posição vertical em função do passe de enchimento executado com o processo convencional (Teste 13)



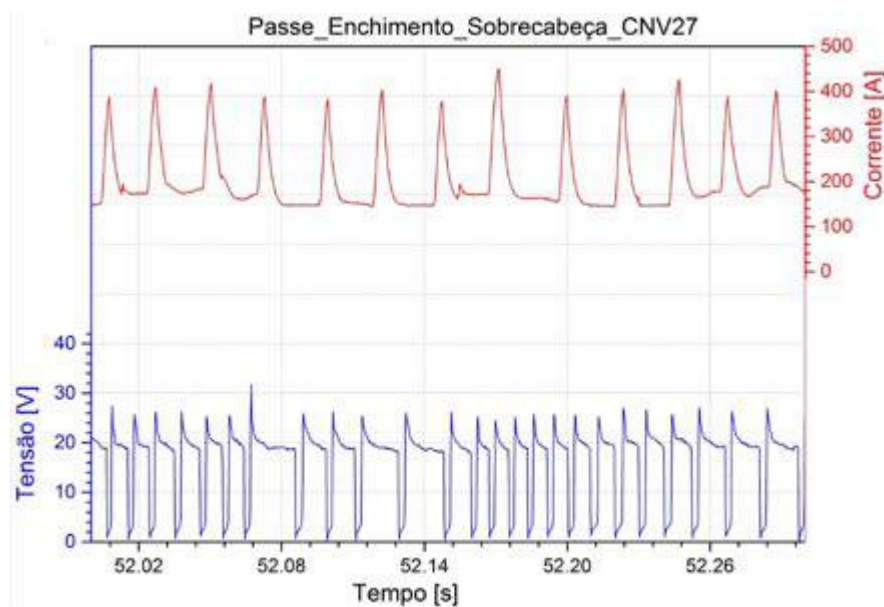


Figura 9.9. Oscilograma da posição sobrecabeça em função do passe de enchimento executado com o processo convencional (Teste 13)

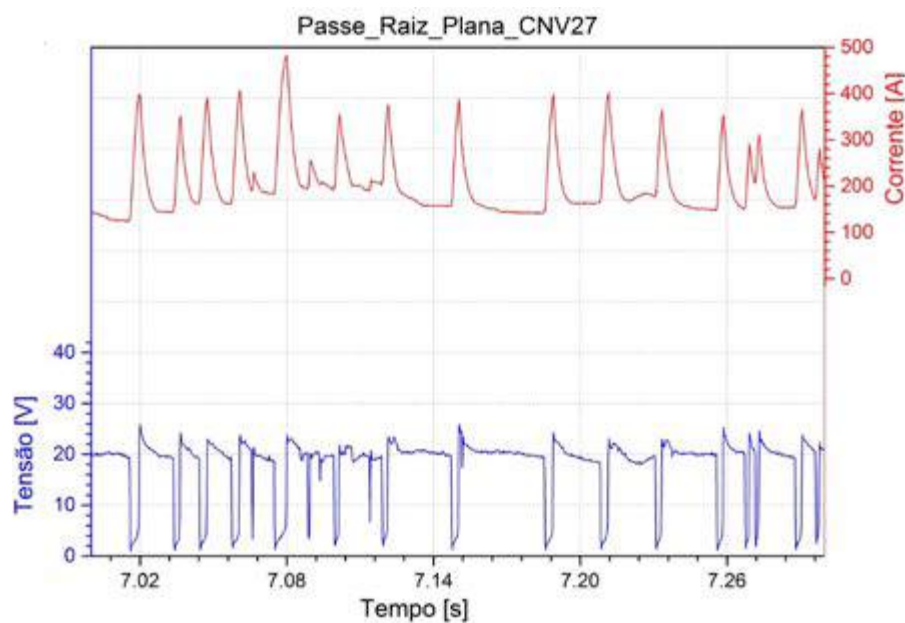


Figura 9.10. Oscilograma da posição plana em função do passe de raiz executado com o processo convencional (Teste 13)

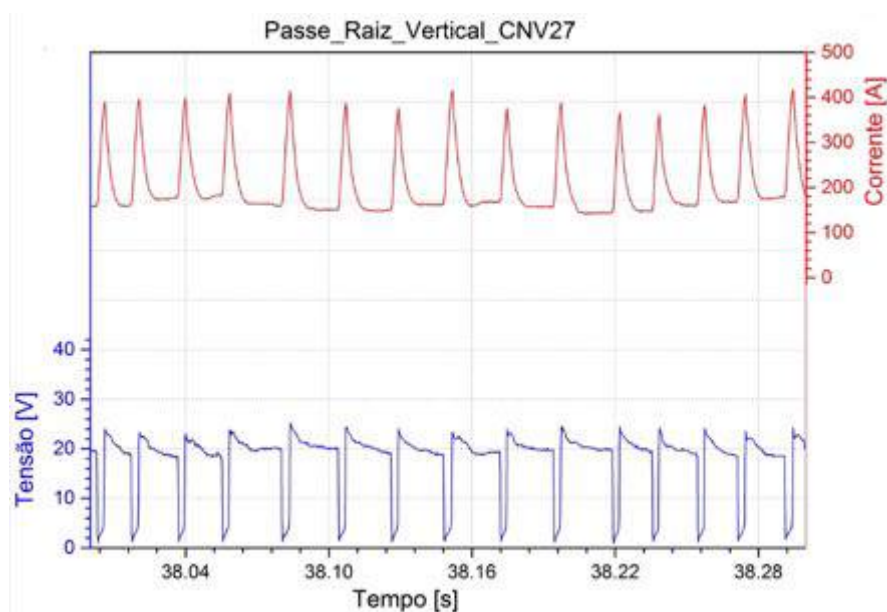


Figura 9.11. Oscilograma da posição vertical em função do passe de raiz executado com o processo convencional (Teste 13)

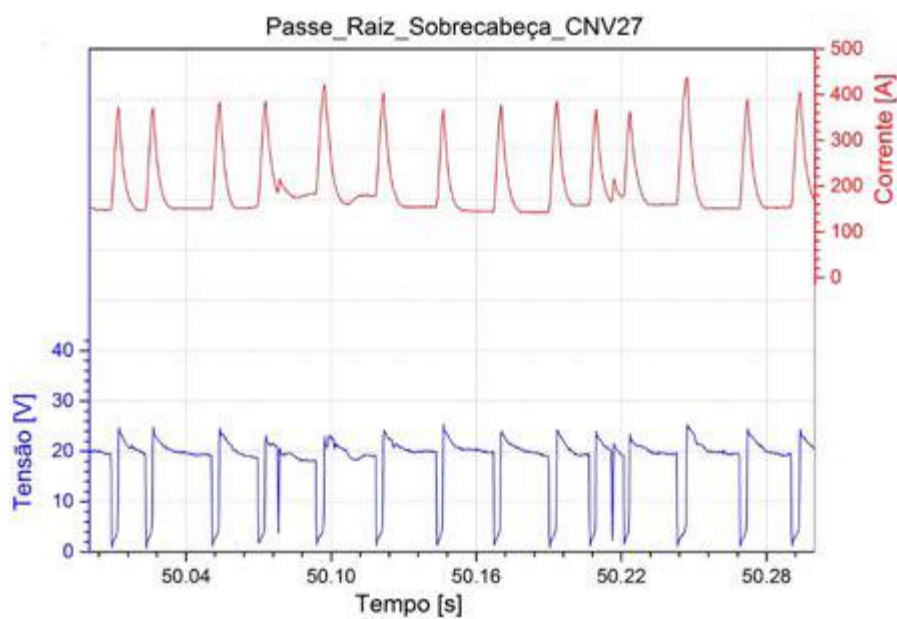


Figura 9.12. Oscilograma da posição sobrecabeça em função do passe de raiz executado com o processo convencional (Teste 13)

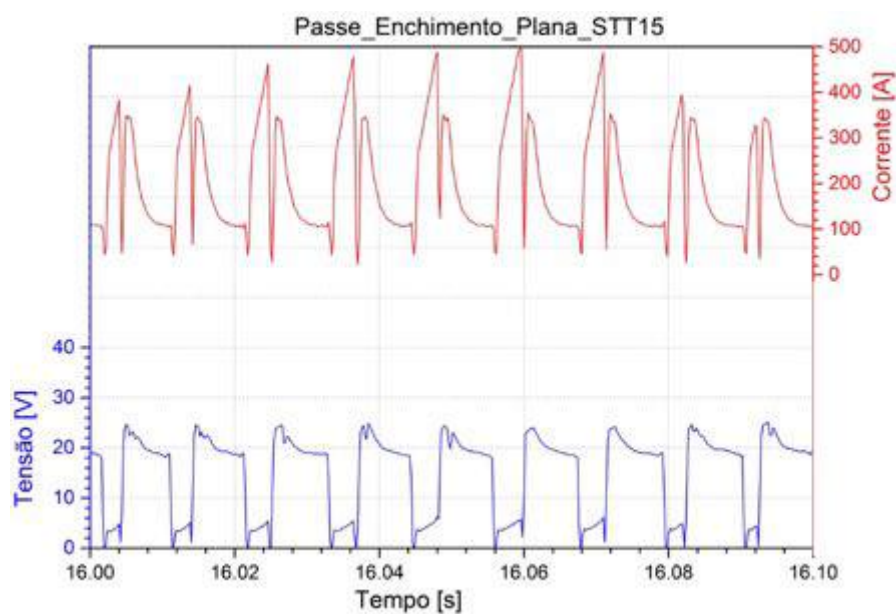


Figura 9.13. Oscilograma da posição plana em função do passe de enchimento executado com o processo derivativo STT (Teste 13)

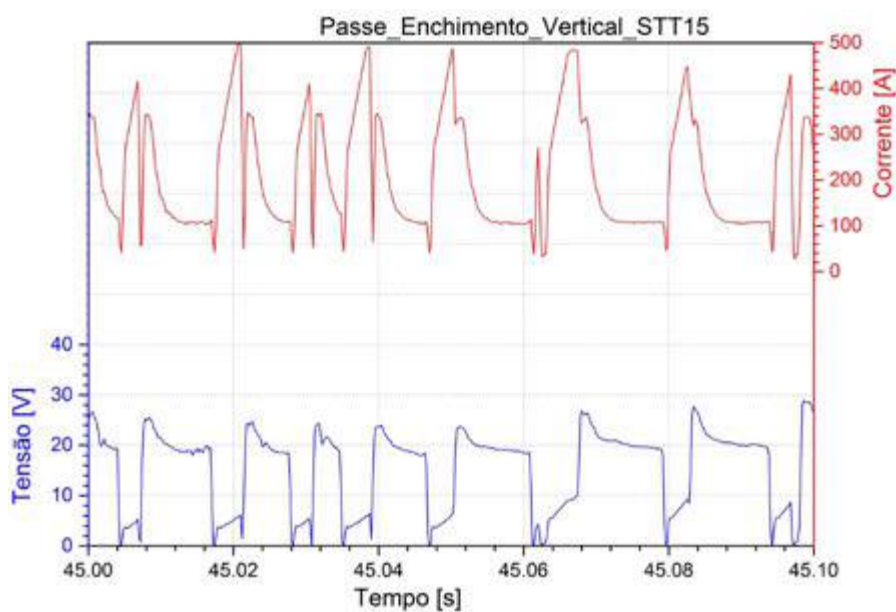


Figura 9.14. Oscilograma da posição vertical em função do passe de enchimento executado com o processo derivativo STT (Teste 13)

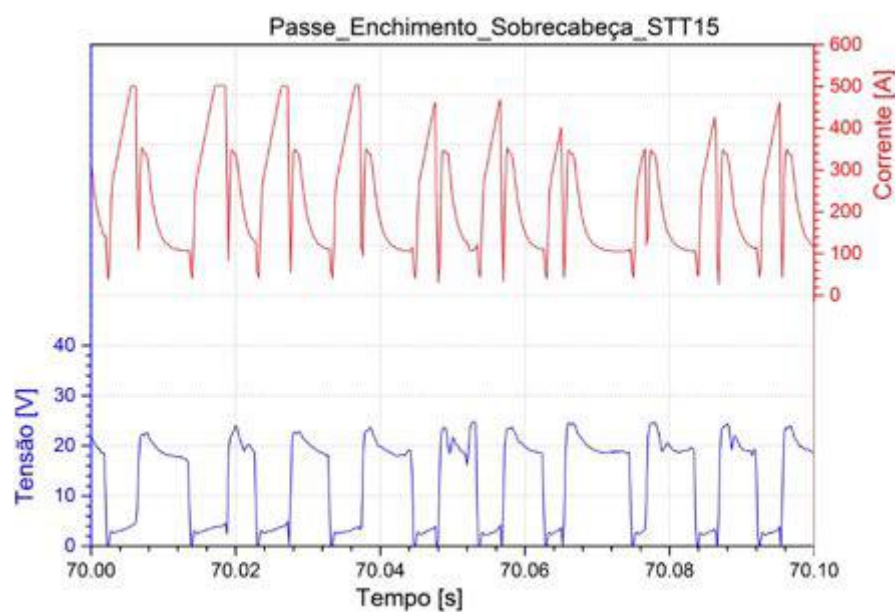


Figura 9.15. Oscilograma da posição sobrecabeça em função do passe de enchimento executado com o processo derivativo STT (Teste 13)

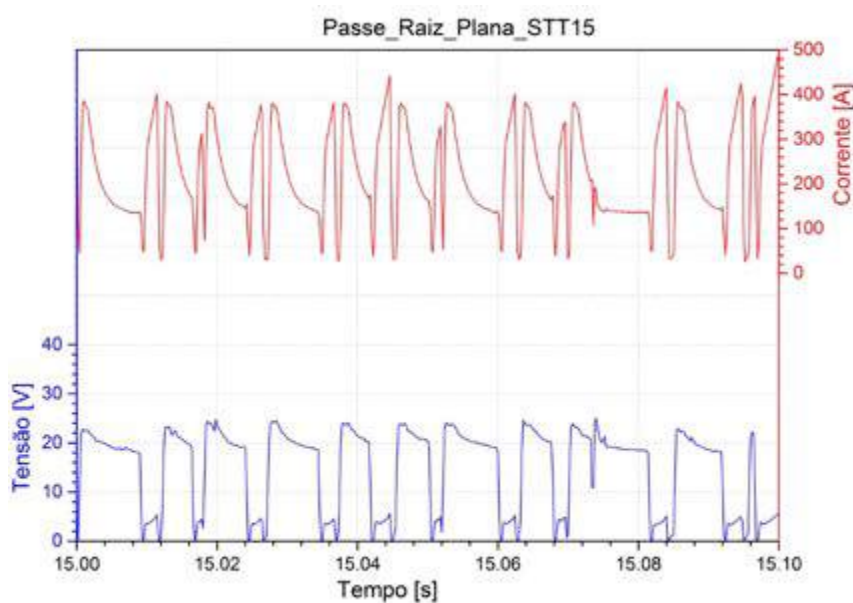


Figura 9.16. Oscilograma da posição plana em função do passe de raiz executado com o processo derivativo STT (Teste 13)

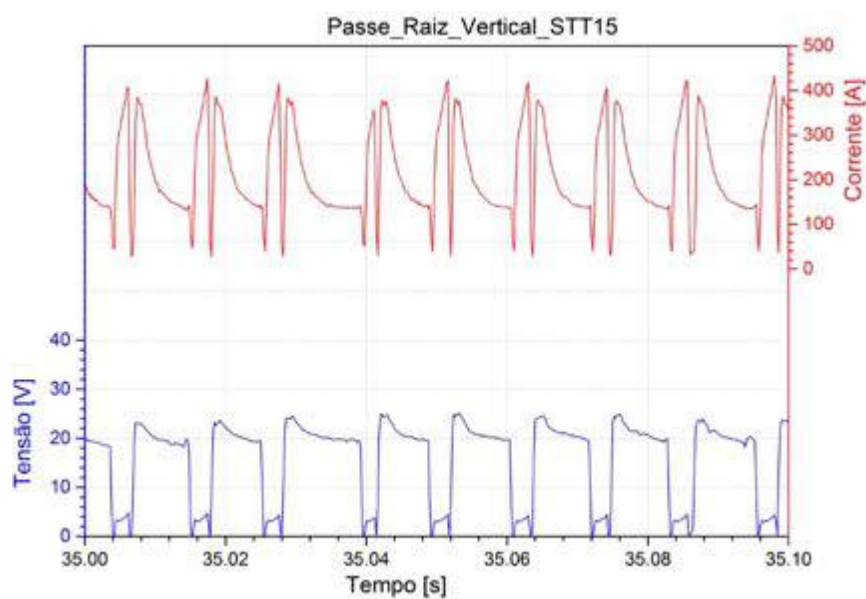


Figura 9.17. Oscilograma da posição vertical em função do passe de raiz executado com o processo derivativo STT (Teste 13)

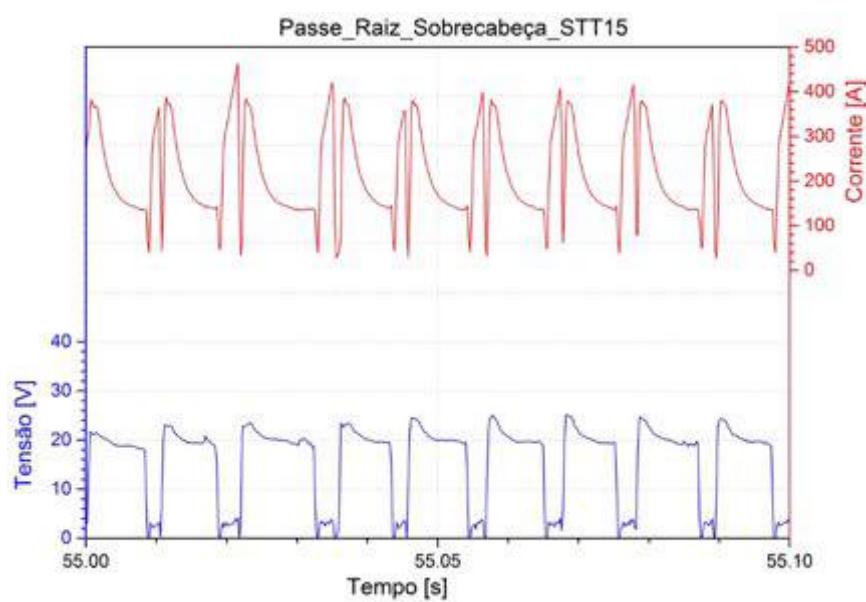


Figura 9.18. Oscilograma da posição sobrecabeça em função do passe de raiz executado com o processo derivativo STT (Teste 13)



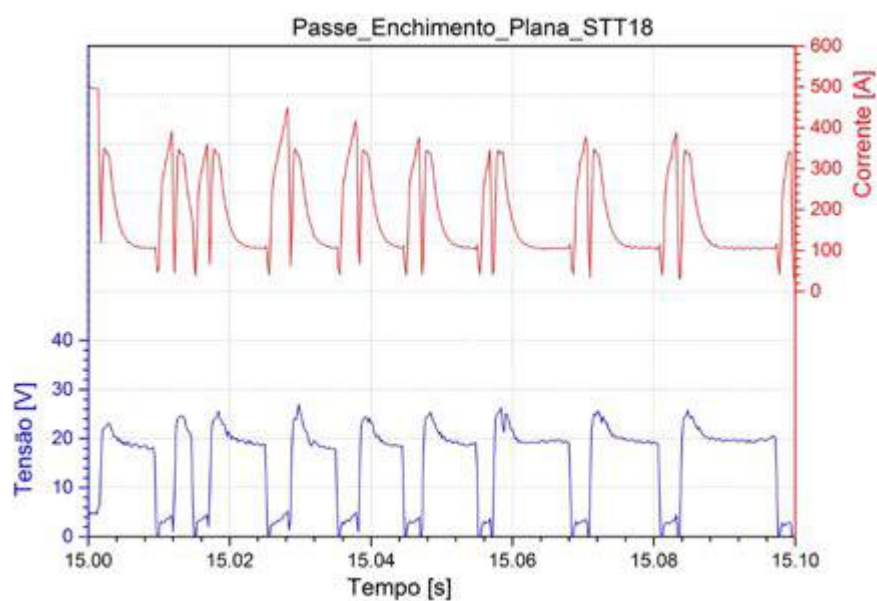


Figura 9.19. Oscilograma da posição plana em função do passe de enchimento executado com o processo derivativo STT (Teste 14)

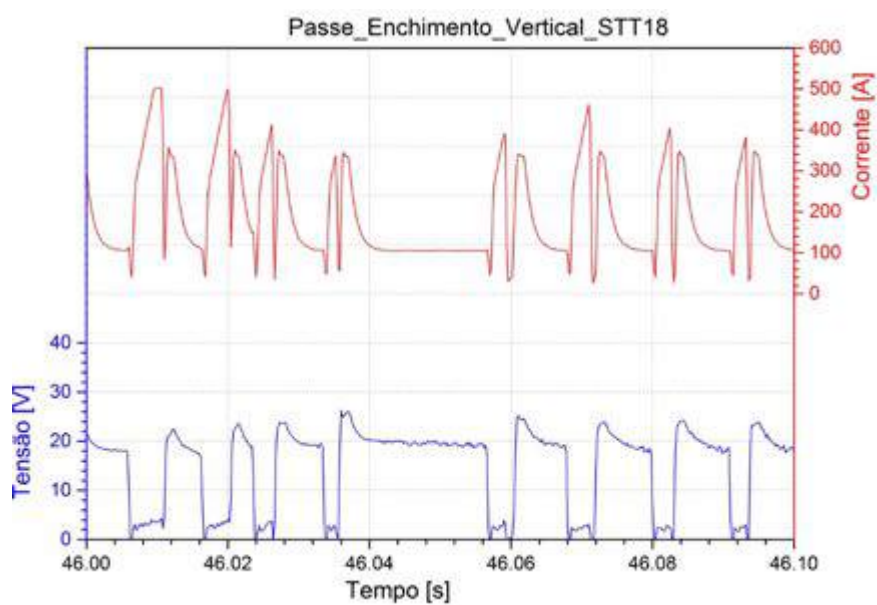


Figura 9.20. Oscilograma da posição vertical em função do passe de enchimento executado com o processo derivativo STT (Teste 14)



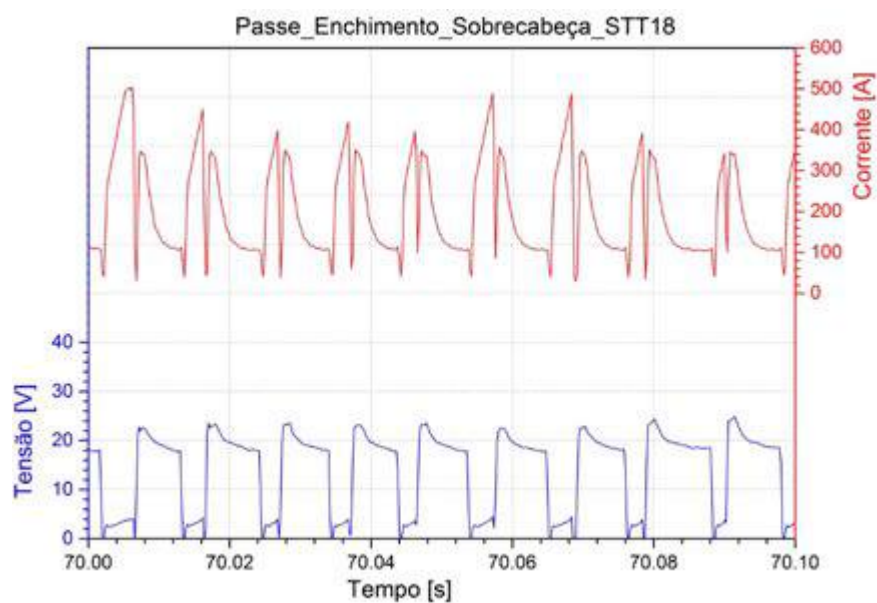


Figura 9.21. Oscilograma da posição sobrecabeça em função do passe de enchimento executado com o processo derivativo STT (Teste 14)

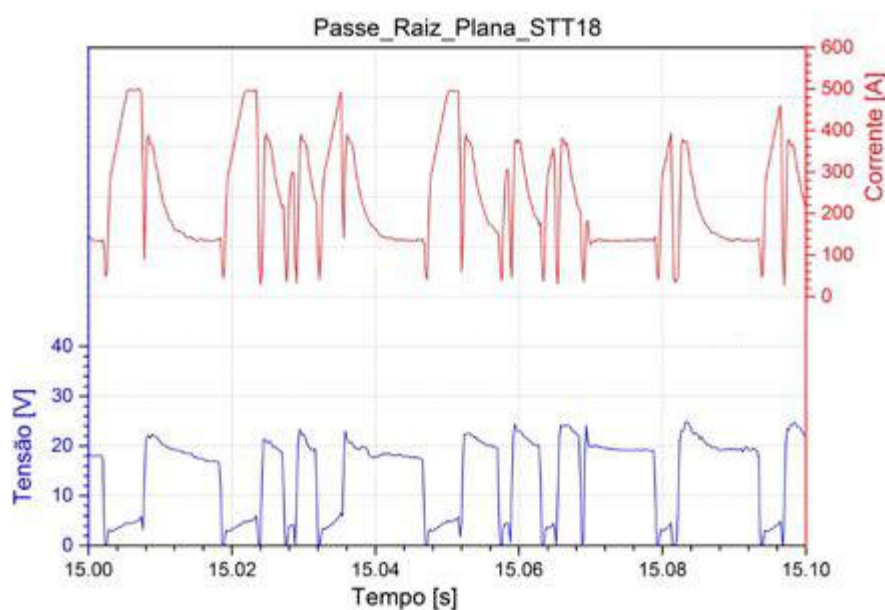


Figura 9.22. Oscilograma da posição plana em função do passe de raiz executado com o processo derivativo STT (Teste 14)

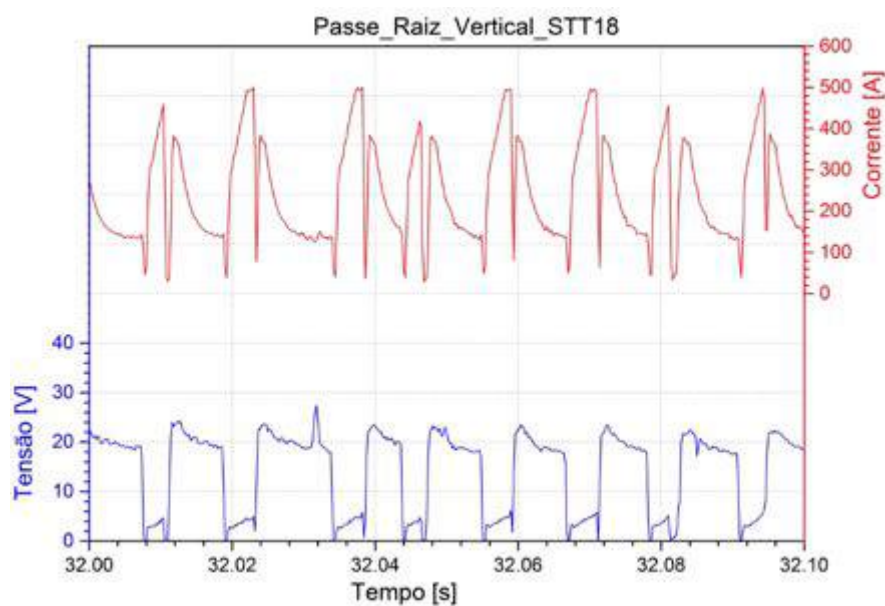


Figura 9.23. Oscilograma da posição vertical em função do passe de raiz executado com o processo derivativo STT (Teste 14)

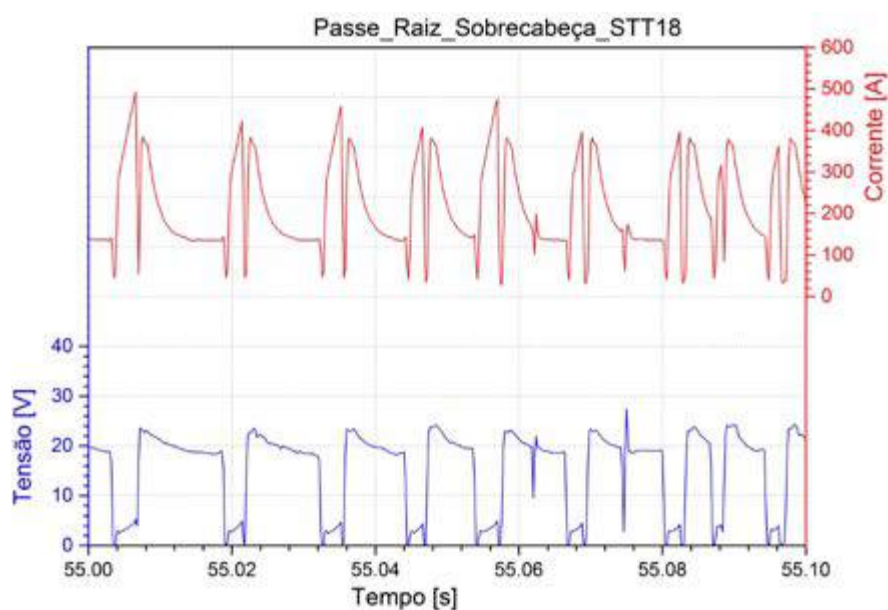


Figura 9.24. Oscilograma da posição sobrecabeça em função do passe de raiz executado com o processo derivativo STT (Teste 14)

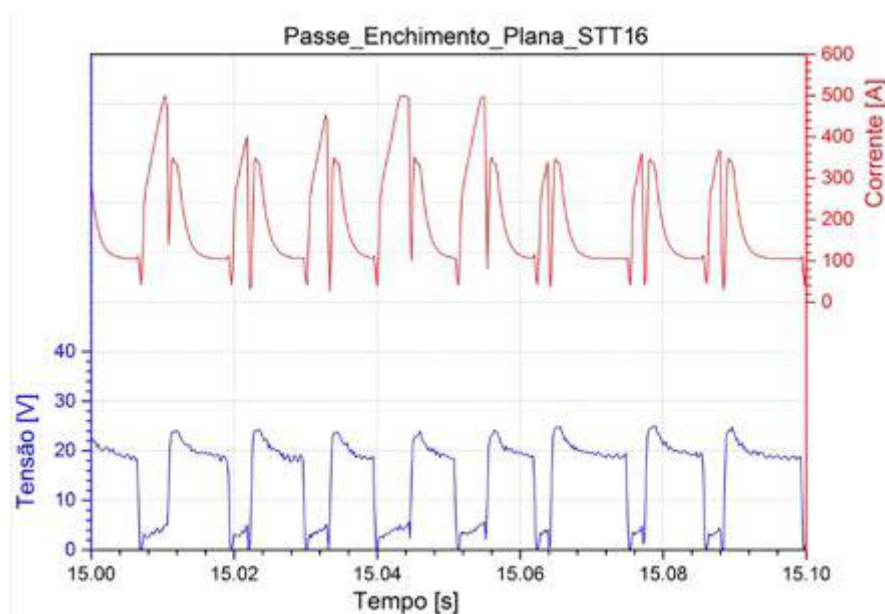


Figura 9.25. Oscilograma da posição plana em função do passe de enchimento executado com o processo derivativo STT (Teste 12)

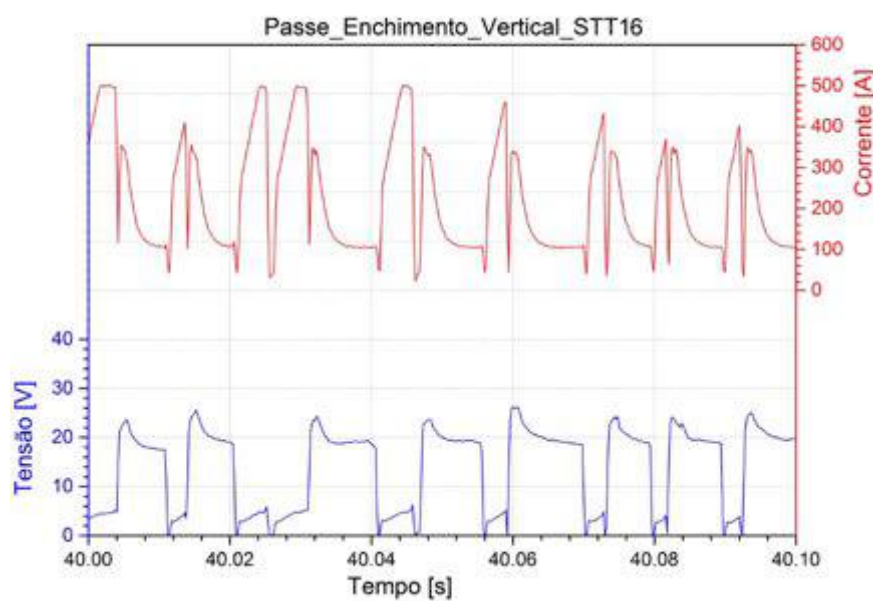


Figura 9.26. Oscilograma da posição vertical em função do passe de enchimento executado com o processo derivativo STT (Teste 12)

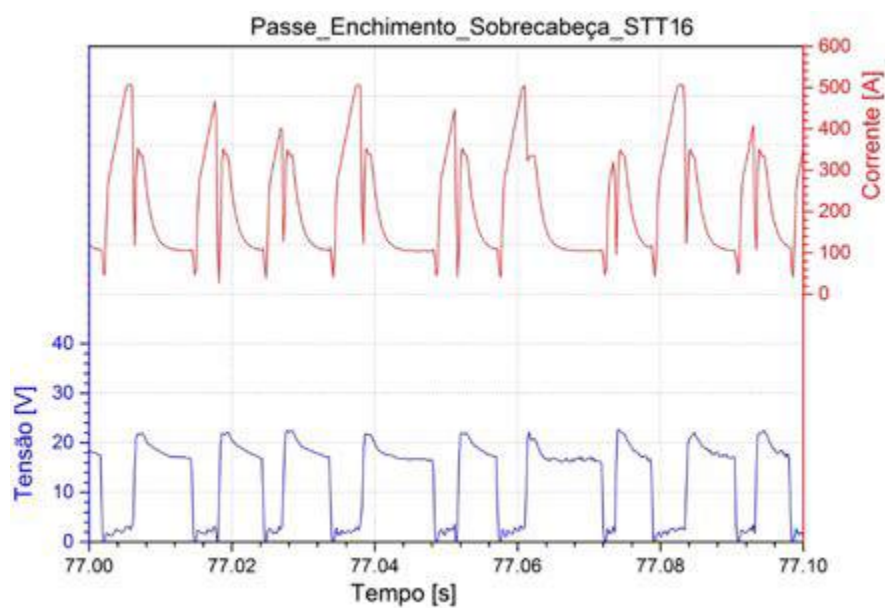


Figura 9.27. Oscilograma da posição sobrecabeça em função do passe de enchimento executado com o processo derivativo STT (Teste 12)

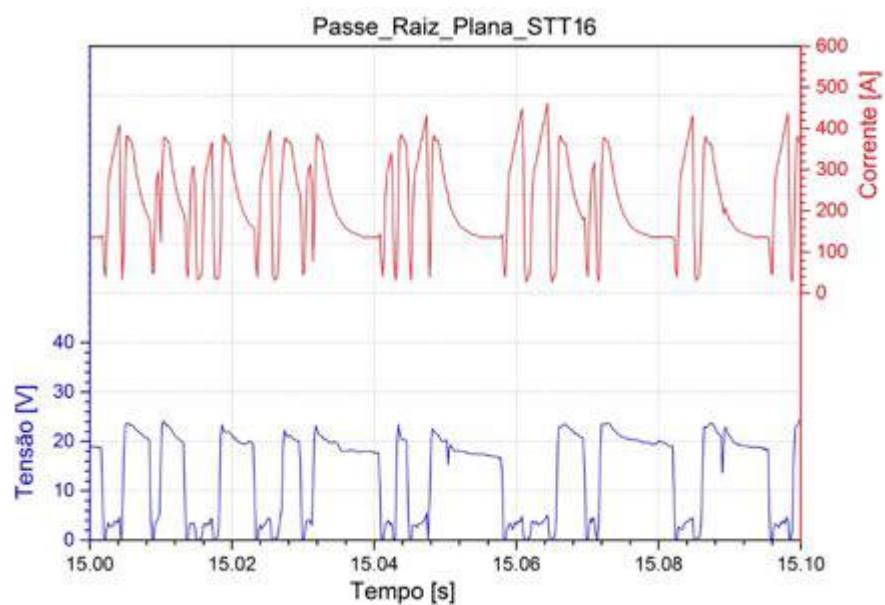


Figura 9.28. Oscilograma da posição plana em função do passe de raiz executado com o processo derivativo STT (Teste 12)

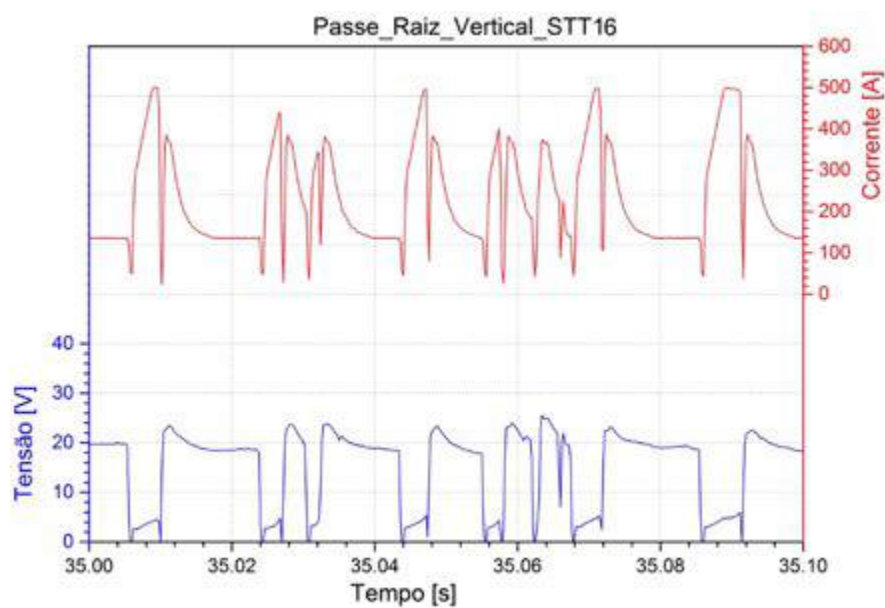


Figura 9.29. Oscilograma da posição vertical em função do passe de raiz executado com o processo derivativo STT (Teste 12)

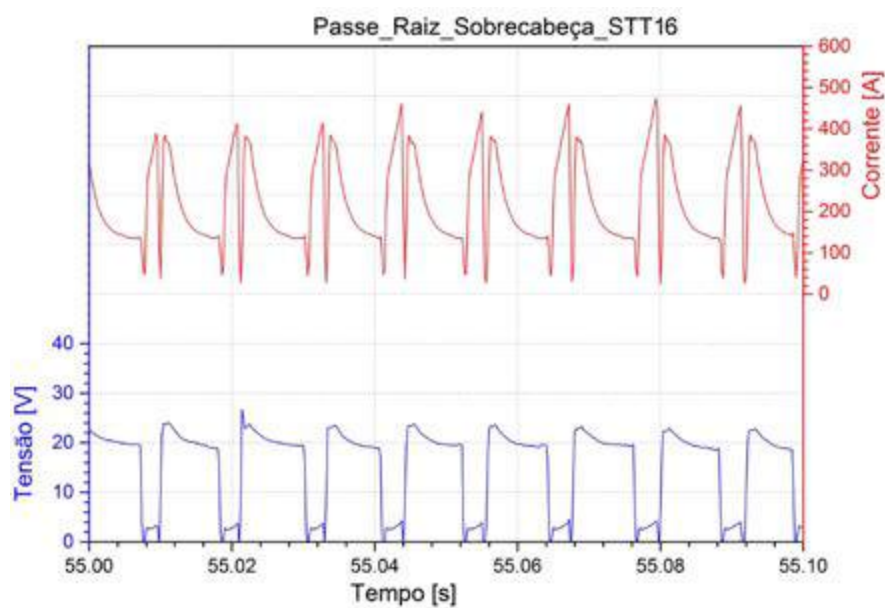


Figura 9.30. Oscilograma da posição sobrecabeça em função do passe de raiz executado com o processo derivativo STT (Teste 12)



# ANEXO I

## Ambiente de Manipulação dos dados do Software Curto 3 (Matlab®)

