

Júlio César Bento Ribeiro

**ANÁLISE DE TÉCNICAS PARA A SOLDAGEM TIG
AUTOMATIZADA**

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

Orientador: Prof. Dr. Eng. Jair Carlos Dutra

Coorientador: Dr. Eng. Régis H. G. e Silva

Florianópolis
2012

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

Ribeiro, Júlio César Bento

Análise de técnicas para a soldagem TIG automatizada
[dissertação] / Júlio César Bento Ribeiro ; orientador,
Jair Carlos Dutra ; co-orientador, Régis Henrique Gonçalves
e Silva. - Florianópolis, SC, 2012.
142 p. ; 21cm

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

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Passe de raiz em tubos. 3.
Alimentação radial e tangencial de arame. 4. Soldagem TIG
orbital. 5. Experimentos industriais. I. Dutra, Jair
Carlos. II. Silva, Régis Henrique Gonçalves e. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Júlio César Bento Ribeiro

**ANÁLISE DE TÉCNICAS PARA A SOLDAGEM TIG
AUTOMATIZADA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovado a em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 03 de setembro de 2012.

Prof. Júlio César Passos, Dr.
Coordenador do Curso

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr.Eng.
Orientador

Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr.Eng.
Co-orientador

Banca Examinadora:

Prof. Régis H. Gonçalves e Silva, Dr.Eng. – Presidente
LABSOLDA / UFSC.

Prof. Carlos Enrique Niño Bohórquez, Dr.Eng. – Membro
Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Carlos E. Iconomos Baixo, Dr. Eng. – Membro
Fundação CERTI /UFSC

Eng. Raul Gohr Junior, Dr. Eng. – Membro
IMC Soldagem

Este trabalho é dedicado...

Aos meus queridos pais, Laura Bento Ribeiro, e In memoriam Ademir da Silva Ribeiro, exemplos de superação.

A minha esposa Olga e filhas, familiares, amigos e comunidade acadêmica, pela energia motivadora.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador, Prof. Dr. Jair Carlos Dutra, e ao Co-orientador Dr. Regis Henrique Gonçalves da Silva pela atuação neste trabalho que resultaram na finalização desta dissertação.

Aos professores Armando Albertazzi, Augusto Buschinelli, Jair Dutra, Carlos Flesch e Walter Weingaetner que ministraram com tanto saber suas respectivas especialidades no exercer da docência contribuindo com minha formação.

Aos doutores e doutorandos, Carlos I. Baixo, Carlos Enrique Niño Bohórquez, Raul Gohr, Nelson Bonacorso, Aldo Pereira, Reinaldo Fayal, Romário Nogueira e Erwin Teichmann e Renon Carvalho pela colaboração através de diversos aspectos neste período de dedicação aos meus estudos.

Aos mestres Mateus B. Schwedersky, Fernando Costenaro, Eduardo Bidese, Rafael Lucas, Marcelo Okuna, Jonathas Alves, Luciano Machado Cirino, Tiara Pimentel e mestrandos Miguel Guayasamin, Felipe Kalil, Fábio Michelin, a cada um meus agradecimentos por todo o apoio e amizade demonstrados e também o aos bolsistas de graduação Ezequiel Gonçalves e Luiz Suliman e Alexandre Weingaetner.

Ao colega de graduação Daniel Souza Cardoso pelo longo trecho compartilhado até chegar este momento.

Aos funcionários do LABSOLDA agradecimentos a Marcia, Ricardo, Roberto, João, Marcus e Cleber.

À equipe Baja por me receber sempre em seu laboratório permitindo assim usufruir de seus equipamentos, meu muito obrigado.

À FAPEU por colaborar na sustentação da manutenção de insumos consumidos no laboratório.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos, no programa PIQDTEC. À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC) por proporcionarem condições financeiras e estruturais.

Ao Instituto Federal de Tecnologia Sul Rio-grandense Pelotas, em especial a Coordenadoria do Curso de Mecânica e à Direção por depositarem credibilidade a minha carreira.

Ao IFESC pela visita de estudo realizada na fábrica da empresa de São Bento do Sul SC, TUPER, que contribuíram no quesito fabricação de tubos de aço, e ao LNLS e LABSOLDA pela oportunidade de participar das soluções e discussões do projeto TIG robotizado na soldagem de elementos filtrantes de Telas Premium.

RESUMO

A soldagem de raiz em tubos de parede espessa é de grande importância para vários segmentos da economia como as do petróleo e gás, naval e civil. A união de topo dos tubos é usualmente praticada de maneira manual, empregando o processo TIG DCEN e gás argônio, adicionando o arame pela frente do arco para o preenchimento da junta de topo com chanfro em V, resultando em soldas cuja qualidade depende da habilidade do soldador em um mercado com carência de profissionais treinados. Para promover a melhoria da produtividade, optou-se por empregar a mistura de gás $\text{Ar}+5\%\text{H}_2$, a corrente de soldagem na forma pulsada e um perfil de chanfro que reduzisse o volume a ser preenchido com solda, sendo imprescindível mecanizar o procedimento para prosseguir o estudo. Uma solda realizada com cabeçote orbital de câmara aberta serviu de referência para comparação da produtividade. Para realizar as soldas foi engendrada uma bancada para a soldagem de tubos estáticos e rotacionais, que recebeu em sua última versão um kit CNC. Foram realizados estudos da soldagem de raiz sem tecimento com a face da raiz em 2 e 4 [mm], sem fresta, para verificar o comportamento da penetração da solda, mas a raiz repetitiva só foi obtida com o chanfro com face da raiz de 2 mm e para o chanfro especial desenvolvido. Um experimento fatorial com três réplicas na posição 1G com AVC possibilitou avaliar a fraca interação com a geometria do cordão de raiz dos fatores, posição de alimentação de arame pela frente e por trás do arco mantendo o ângulo de alimentação radial para os tubos Schedule 40 de 3" e de 4", e a forte interação com o perfil de chanfro. Para o desempenho dos gases observou-se um ganho em VS de 229%, e de 79% para o chanfro de perfil especial que preencheu em média a mais, 5 mm^2 da cavidade da junta, ou 12 mm^2 a mais em média a área fundida. Foram realizados ensaios de viabilidade em soldas de raiz com corrente pulsada e alimentação radial de arame na posição 5G e 6G e com corrente constante na posição 6G com introdução tangencial de arame (TOPTIG), e constatou-se que ambos os métodos foram considerados como viáveis a aplicação da solda de raiz.

Palavras-chave: Passe de Raiz em Tubos; Alimentação Radial de Arame; Alimentação Tangencial de Arame; Soldagem TIG Orbital.

ABSTRACT

The root welding thick-walled tubes is of great importance for several economic segments such as oil and gas, marine and civil. The top tube link at usually is practiced in a manual way, using DCEN TIG process and argon gas, adding the wire in front the arc to fill the joint top with V-groove, resulting in welds whose quality depends on the welder skill in a market with few trained professionals. The productivity improvement to be stimulated it was applied Ar +5% H₂ gas mixture, welding current in pulsed way and a groove profile that reduced the volume to be filled with solder, it is indispensable to automate the procedure for further study. A weld held with orbital head open chamber worked as productivity comparison reference. The welds to be held it was engendered a bench of static and rotational welding pipe, which received in its latest version a CNC kit. It was carried out studies about welding root without oscillation with root face of 2 and 4 [mm], without crack, to verify the weld penetration behavior, but the repetitive root was only obtained with the root face with chamfer 2 mm and the chamfered specially developed. A factorial experiment with three replicates in 1G position with stroke was possible to evaluate the weak interaction with the geometry of the umbilical root factors. However, the input of the radial wire feed in front and behind the arc to the Schedule tubes 40 of 3" and 4" and the strong interaction with the groove profile. The performance of gases was observed to obtain VS. 229%, and 79% for the special groove profile that filled more than 5 mm² of the joint cavity or 12 mm² more fused area than the averages. It was held viability tests in root welds with pulsed current in the positions 5G and 6G radial wire feed and in the 6G position with tangential wire feed (TOPTIG), and it was realized that both methods were considered as viables to the root weld application.

Keywords: Root Pass on Pipes, Radial Wire Feed, Tangential Wire Feed, Orbital TIG Welding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1– Curvas características do arco TIG quando se emprega o gás argônio para três comprimentos de arco em 2, 4 e 6 mm [3].	30
Figura 2-2 – Temperatura de contorno (10000 a 20000 K) do arco.....	31
Figura 2-3 – Arco TIG: (a) com anôdo difuso; (b) com anodos pontuais; (c) com ponto anódico; d) Elementos da força de Lorentz no circuito [8].	32
Figura 2-4 – Bocal TIG com porta eletrodo e tela de gás “gás lens”	33
Figura 2-5 – Efeito do ângulo do vértice do cátodo na densidade de corrente do arco no anôdo [7].	34
Figura 2-6–Efeito da corrente na densidade de corrente no arco TIG [7].	34
Figura 2-7 – Efeito comprimento de arco na densidade de corrente [7].	35
Figura 2-8 – Adaptada dos perfis da zona de fusão como função da geometria da ponta do eletrodo e do tipo de gás de proteção. De Key apud. © 1980 AWS [11].	36
Figura 2-9 – Potência específica segundo processo e aplicação [12].	36
Figura 2-10 – Taxa de fusão do metal base por acréscimo de hidrogênio misturado ao Argônio [13].	38
Figura 2-11 – Imagens de arcos com diferentes gases[8].	39
Figura 2-12 – Variação da área do arco e do diâmetro anódico para diferentes misturas, EWTh-2, 2,4 mm, 90 ⁰ vértice do cátodo, DEP=3 mm [9].	40
Figura 2-13 – Forma de onda da corrente no processo TIG pulsado [1].	42
Figura 2-14 – Arco TIG com 2 kHz de frequência de pulsação [15].	44
Figura 2-15 – Sistema para mecanização do arame.	47
Figura 2-16 – TIG arame frio, comparação manual e automático[2].	48
Figura 2-17 – Vantagens da configuração da tocha TOPTIG[19].	49
Figura 2-18 – Sistema TIPTIG.....	50
Figura 2-19 – À esquerda soldagem típica de tubos em espelho de trocador de calor e a direita soldas de revestimento em vários casos....	51
Figura 2-20 – Cabeçote orbital de câmara aberta.	52
Figura 2-21 – AVC, unidade de controle.	54
Figura 2-22 – Solda de raiz em único passe com o processo K-TIG[24].	56
Figura 2-23 – Solda realizada em único passe com duas tochas e com dois eletrodos em cada uma, MIG/MAG Tandem, em tubo API X100.	56

Figura 2-24 – Junta típica empregada na preparação de tubos, $\alpha=75^{\circ}$ [25].	57
Figura 2-25- Perfis de chanfro para a soldagem de tubos de parede espessa, (a) com e (b) sem a utilização de backing de cobre.	57
Figura 3-1– Desenho da junta a soldar	59
Figura 3-2– Elementos do chanfro	60
Figura 3-3 – Bancada eletromecânica	62
Figura 3-4 – Posições da soldagem de topo em tubulações	63
Figura 3-5 – Bancada CNC para soldagem 1G com AVC, com 2 graus de liberdade ajustados manualmente e 2 graus de liberdade mecanizados	64
Figura 3-6– Bancada para soldagem de tubos estáticos e rotacionais em qualquer posição	65
Figura 3-7 – Sistema de controle e motor	67
Figura 3-8 – Bocais TIG adaptados à alimentação radial de arame	67
Figura 3-9 – Adaptada de LANCASTER apud MODENESI (2009)[8].	68
Figura 3-10 – Sentido de $V_a=V_S$ (por trás) e sentido de $V_a\neq V_S$ (pela frente)	69
Figura 3-11 – Possibilidades de posicionamento de alimentação de arame; ângulo de alimentação de arame; progressão da solda e parametrização setorial	69
Figura 3-12 – Elementos de um cordão de raiz	71
Figura 4-1 – Situação de soldagem 1G com alimentação radial	74
Figura 4-2 – Imagens da face da solda e da raiz da solda, para $U=9,6$ V.	74
Figura 4-3 – Imagens da face e da raiz da solda com gás argônio puro	75
Figura 4-4 – Macrografias: esq. tensão de arco 9,3 V; dir. 12 V	76
Figura 4-5 – Oscilograma de tensão quando se utiliza o AVC ajustado para a tensão média de 12 V e corrente pulsada média de 113 A	77
Figura 4-6 – Parâmetros ajustados no AVC	77
Figura 4-7– Soldas variando a V_S em tubos <i>Schedule 80</i> de 3", gás $Ar+5\%H_2$	78
Figura 4-8 – Passe com elevada energia na raiz da solda, nariz 2,5 mm.	79
Figura 4-9 – Comportamento da área com variação na V_S	80
Figura 4-10– Macrografias de soldas obtidas com 12 e 14 V	81
Figura 4-11 – Raiz intermitente e macrografia do segmento sem raiz	82

Figura 4-12 – Alterações nas correntes de base e de pulso e efeito no na geometria do cordão de raiz.	83
Figura 4-13 – Alterações na VS e o efeito geométrico na altura do cordão.	84
Figura 4-14 – Alterações na corrente contínua pulsada média de soldagem e efeito na altura do cordão, ao utilizar a mistura de gás Ar+5%H ₂	85
Figura 4-15– Comportamento da curva eficiência de fusão devida a alterações na corrente pulsada média, Ar+5%H ₂	86
Figura 4-16 – Alterações na corrente contínua pulsada média de soldagem e efeito na altura do cordão de solda, ao utilizar a mistura de gás Ar+5%H ₂	87
Figura 4-17 – Macrografias do efeito da corrente contínua pulsada média de soldagem na penetração da solda, ao utilizar mistura de gás Ar+5%H ₂	87
Figura 4-18 – Comportamento da evolução da área depositada com o aumento da VS, parâmetro 1G, ao utilizar a mistura de gás Ar+5%H ₂	88
Figura 4-19- Diagrama, alimentação pulsada de arame, do ensaio 6.4 da Tabela 4.1.	89
Figura 4-20 – a) união inicial de dois segmentos de tubo, ponteamto autógeno espaçado a 120 ⁰ ; b) soldas de raiz e posicionamento do quarto segmento de tubo para realização do terceiro cordão de raiz.	92
Figura 4-21 – Comportamento da dispersão ao usar o coeficiente de variação nos ensaios de repetitividade, para a variável largura da face (Lf).	93
Figura 4-22 – Comportamento da dispersão ao usar o coeficiente de variação nos ensaios de repetitividade, para a variável largura da raiz (Lr).	94
Figura 4-23 – Intervalo de confiança para a característica largura do cordão para 24 soldas de raiz com a mistura de gás Ar+5%H ₂	95
Figura 4-24– Gráfico de interação dos fatores A, B e C e a largura da face.	97
Figura 4-25 – Gráfico de interação dos fatores A, B e C e a largura da raiz.	97
Figura 4-26 – Gráfico de interação dos fatores A, B e C e a altura X... ..	98
Figura 4-27 – Gráfico de interação dos fatores A, B e C e o reforço na raiz.	99
Figura 4-28 – Gráfico de interação dos fatores A, B e C e o fator de forma.	99
Figura 4-29 – Gráfico de interação dos fatores A, B e C e área fundida (Af).	100

Figura 4-30 – Áreas remanescentes a serem preenchidas com solda para os chanfros de 2 mm e chanfro especial, antes e depois da solda, <i>Sch</i> 40 de 4”	103
Figura 4-31- Eficiência de fusão dos ensaios de repetitividade	106
Figura 4-32 – Solda 5G, cordão A, pulsado de 0,24 Hz.	109
Figura 4-33 – Solda 5G, cordão C, com pulsado de 1 Hz.....	110
Figura 4-34 – Solda 5G, cordão D, com pulsado de 5 Hz.....	110
Figura 4-35 – Cordão 5, face raiz e macrografia da Seção da solda 6G.	112
Figura 4-36– Relações geométricas importantes no processo TIG alimentado.....	113
Figura 4-37 – Macrografias dos ensaios realizados em bancada plana com alimentação tangencial (ATT) e radial (ART) alimentado por trás do arco.....	114
Figura 4-38– Situação dos ensaios com ângulo de alimentação tangencial (1) e radial (2), posicionado pela frente e por trás do arco.	115
Figura 4-39– Macrografias dos ensaios realizados em bancada plana com alimentação tangencial (ATF) e radial (ARF) alimentado pela frente do arco.	116
Figura 4- 40- Gráficos de interação de fatores para a característica resposta ângulo de molhamento. Excel – suplementos – DOE- gráfico de efeitos.	119
Figura 4-41– Bancada plana, tocha adaptada à alimentação tangencial.	120
Figura 4-42 - Solda 6G, realizada com alimentação tangencial de arame.	123

LISTA DE TABELA

Tabela 2-1 – Produtividade entre dois gases na soldagem de raiz TIG autógena do aço AISI 304 com 1 mm de espessura [14].....	38
Tabela 2-2 – Variação da tensão, com misturas de gás com argônio[9].	39
Tabela 3-1– Composição química e propriedades do material do tubo comparado à norma API 5L [25].....	59
Tabela 3-2 – Tubo Schedule (API 5L grau A ou ASTM A106 grau B) 60	
Tabela 3-3 – Os parâmetros do passe de raiz (Polysoude).....	71
Tabela 3-4 – Faixas de medição do SAP.....	72
Tabela 4-1– Parâmetro Va e o surgimento da raiz.	89
Tabela 4-2 – Tabela dos fatores, níveis e resultados.	91
Tabela 4-3 – O menor desvio padrão, e a melhor combinação.	93
Tabela 4-4 - Limites do intervalo de confiança, Lf como exemplo.....	96
Tabela 4-5 – Desempenho entre diferentes gases e chanfros iguais....	101
Tabela 4-6 – Comparativo das VS do tubo de 4”.....	102
Tabela 4-7- Elementos de chanfro estimativos e medições de área. ...	102
Tabela 4-8 – Matriz fator e níveis	103
Tabela 4-9 – Schedule 40, 4”, desempenho dos chanfros.	104
Tabela 4-10- Schedule 40, 3”, desempenho dos chanfros.....	104
Tabela 4-11 – Sobreposição do cordão e número de pulsos sobre a poça.	108
Tabela 4-12 – Ensaio na posição 5G na bancada orbital.	109
Tabela 4-13 – Ensaio na posição 6G na bancada de estudo orbital. ...	111
Tabela 4-14 – Ensaio fatorial com TIG alimentado.	113
Tabela 4-15 – Efeitos sobre a área devido à influência dos fatores e níveis.	117
Tabela 4-16 – Efeitos sobre a penetração devido à influência dos fatores.	118
Tabela 4-17 – Efeitos sobre o reforço na face devido à influência dos fatores.....	118
Tabela 4-18 – Taxa de deposição e área do cordão depositado.....	121
Tabela 4-19 – Resultados na bancada plana com alimentação tangencial.	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TIG	Tungsten Inert Gas
TIG DCEN	Tungsten Inert Gas Direct Current Electrode Negative
CNC	Comando Numérico Computadorizado
AVC	Automatic Voltage Control
AWS	American Welding Society
API	American Petroleum Institute
ER70S-6	Arame ou eletrodo de aço cobreado maciço
EWTh-2	Eletrodo de tungstênio dopado a 2% com tório
GAP	Folga ou fresta
DEP	Distância Eletrodo a Peça
VS	Velocidade de soldagem
IP	Corrente de pulso
I _b	Corrente de base
I _m	Corrente média
t _p	Tempo de pulso
t _b	Tempo de base
T	Período de pulsação
F	Frequência
Π	Constante Pi
V _a	Velocidade de alimentação de arame
V _{ap}	Velocidade de alimentação de arame no tempo de pulso
V _{ab}	Velocidade de alimentação de arame no tempo de base
V _{am}	Velocidade de alimentação de arame média
Ar+5%H ₂	Mistura de gás argônio com 5% de hidrogênio
H ₂	Hidrogênio molecular
Ar	Argônio puro
1G	Posição plana em junta de topo
5G	Posição orbital em junta de topo
6G	Todas posições em junta de topo
L _r ou LR	Largura da raiz
L _f ou LF	Largura da face
hr	Altura do reforço
x	Altura remanescente para nivelamento da solda com adição
R _f	Reforço na face
ff	Fator de forma
NC	Número de combinações
FC	Fatores de controle
DOE	Design Of Experiment – Planejamento de experimentos
A _T	Área total fundida medida na seção transversal do cordão

A_f	Área fundida do metal de base
A_d	Área do metal de solda depositado
A_{tr}	Área total removida da junta a soldar
A_r	Área remanescente, sem enchimento, medida na junta após o passe de raiz
X_r	Altura remanescente medida na junta após passe de raiz
H	Entalpia de fusão
U	Tensão de soldagem
I	Corrente de soldagem
P	Potência do arco
Θ	Ângulo de ataque (ângulo formado entre o eixo do eletrodo e a direção de soldagem)
α	Ângulo de alimentação do arame
η_t	Eficiência térmica do processo (adimensional)
η_f	Eficiência de fusão
DEP	Distância eletrodo a peça
DEA	Distância eletrodo ao arame
DLEA	Distância da lateral do eletrodo ao arame
ATF	Alimentação de arame tangencial pela frente do arco
ATT	Alimentação de arame tangencial por trás do arco
ARF	Alimentação de arame radial pela frente do arco
ART	Alimentação de arame radial por trás do arco

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO.....	25
1.1- OBJETIVO GERAL	27
1.2- OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	27
2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1- CARACTERÍSTICAS DO ARCO TIG.....	29
2.1.1- Característica Estática do Arco TIG.....	29
2.1.2- A distribuição de temperatura do arco TIG.....	31
2.1.3- Sopro magnético e deflexão do arco	31
2.1.4- A densidade de corrente no arco TIG	33
2.1.5- Efeito do ângulo da ponta do eletrodo na penetração da solda	35
2.1.6- Potência específica	36
2.1.7- Gases de Proteção	37
2.2- TÉCNICAS DE SOLDAGEM TIG E ASPECTOS DA PRODUTIVIDADE	40
2.2.1- Efeito da pulsação na solda	43
2.2.2- Considerações sobre a corrente pulsada	44
2.2.3- Descontinuidades de soldagem.....	45
2.3- VARIANTES DO PROCESSO TIG	46
2.3.1- Produtividade do TIG Arame frio (Cold Wire)	47
2.3.2- Produtividade do TIG arame quente (Hot Wire).....	48
2.3.3- O processo TIG arame frio com alimentação tangencial do arame.....	49
2.3.4- O processo TIG com alimentação do arame radial alternada	50
2.4- O PROCESSO TIG NA SOLDAGEM ORBITAL E CABEÇOTES ROTACIONAIS.....	51
2.5- CONTROLE AUTOMÁTICO DA TENSÃO: AVC	53

2.6- ASPECTOS DA PRODUTIVIDADE NA SOLDAGEM DO PASSE DE RAIZ E ESTADO DA ARTE.....	54
3- MATERIAIS E MÉTODOS.....	59
3.1- CARACTERIZAÇÕES DO MATERIAL E DA JUNTA A SOLDAR.	59
3.2- DESENVOLVIMENTO E MELHORIAS NA BANCADA PARA SOLDAGEM DE TUBOS.....	62
3.3- DESENVOLVIMENTO DE BOCAIS DE TOCHA COM GUIA	67
3.4- VARIANTES DO PROCESSO TIG ARAME FRIO.....	68
3.5- SOFTWARE IMAGE TOOLS.....	70
3.6- PARÂMETROS SETORIAIS DE PROCEDIMENTO USUAL INDUSTRIAL EMPREGADO NA SOLDAGEM DE TUBOS ESTÁTICOS.....	71
3.7- A INCERTEZA DE MEDIÇÃO EM PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM.	72
3.8- SISTEMA DE AQUISIÇÃO PORTÁTIL.....	72
4- RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1- MOTIVAÇÃO E ORDENAÇÃO DOS ENSAIOS.....	73
4.2- ENSAIOS DE SOLDAGEM EM TUBOS.....	73
4.2.1- Reprodução do parâmetro de referência adotado ou comercial, posição 1G com gás argônio puro.	73
4.2.2- Influência do comprimento de arco na soldagem de raiz com argônio puro e face da raiz em 2,0 mm.	74
4.2.3- Verificação da raiz da solda com argônio puro (n = 2,2 mm).	76
4.2.4- Apuração da raiz da solda, com gás Ar+5%H₂ quando se atuar na VS.....	77
4.2.5- Verificação da raiz da solda, parâmetro comercial, para n=2,5 mm.....	78
4.2.6- Verificação do efeito da VS sobre a área fundida.....	79
4.2.7- Influência da DEP na soldagem de raiz e a forma de deposição do arame.....	80

4.2.8- Verificação da raiz, para a face da raiz em 4,4 mm, obtida com o aumento da tensão, empregando Ar +5%H₂.	81
4.2.9- Soldagem de raiz em tubo <i>Schedule</i> 40 de 4”, com a face da raiz em 4 mm e a baixa repetitividade da raiz.	82
4.2.10- Relações entre a VS e a altura do cordão.	84
4.2.11- Análise da corrente de pulso e da corrente de base e o efeito na altura do cordão e na eficiência de fusão.	85
4.2.12- O efeito da velocidade do arame no surgimento da raiz.	88
4.3- ANÁLISE DA POSIÇÃO DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME. ..90	
4.3.1- Justificativa para realizar os ensaios com a velocidade de arame constante, nos ensaios de repetitividade.	90
4.3.2- Ensaios de repetitividade.	91
4.3.3- Resultados dos ensaios de repetitividade	93
4.3.4- Resultados em termos de ganho de produtividade.	100
4.3.5- Considerações sobre a eficiência de fusão dos ensaios de repetitividade	105
4.4- CONSIDERAÇÕES SOBRE A FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO NA SOLDAGEM ORBITAL 5G.	108
4.5- SOLDAGEM 6G NA BANCADA COM ALIMENTAÇÃO RADIAL DE ARAME.	110
4.6- ENSAIOS NA BANCADA PLANA COM DIFERENTES ÂNGULOS E POSIÇÕES DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME.	112
4.7- ESTUDO DE PARÂMETROS NA SOLDAGEM DE RAIZ NA BANCADA PLANA COM ALIMENTAÇÃO TANGENCIAL	120
4.8- VIABILIDADE DE SOLDAGEM 6G COM ALIMENTAÇÃO TANGENCIAL DE ARAME.	122
5- CONCLUSÕES	125
6- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	127
REFERÊNCIAS CITADAS	129
APÊNDICE A – TABELAS REFERENTES AOS ENSAIOS DE REPETITIVIDADE	133

**APÊNDICE B – TABELAS DE ENSAIOS NA SOLDAGEM DE
RAIZ EM TUBOS.....138**

1- INTRODUÇÃO

Procedimentos de soldagem com elevado grau de automatismo empregando a adição controlada de metal a junta tem sido cada vez mais explorados. Um dos fenômenos básico a controlar consiste no equilíbrio estabelecido entre a energia disponibilizada para fundir e os fatores que dificultam o controle morfológico da região fundida, fomentando um grande número de pesquisas.

Dentre as possibilidades de realização de tais pesquisas, pode-se citar a soldagem de raiz circunferencial em tubos, praticada na etapa montagem. O interesse no estudo deste tipo de aplicação dá-se devido às dificuldades com relação ao controle processual que assegure a raiz da solda com eficiência, na soldagem mecanizada. Uma distinção pode ser feita ao se comparar dois processos de soldagem a arco tais como o MIG/MAG e o TIG. Naquele, o arco está associado à deposição de metal e, portanto, a energia disponibilizada por ele é parcialmente consumida ao fundir o arame eletrodo. Enquanto que no TIG, o arco é estabelecido entre o eletrodo não consumível e a junta, havendo total independência com o metal de solda, fato este que contribui na precisão com que a energia é controlada na raiz da solda.

Geralmente um procedimento de soldagem tem por objetivo a união de dois materiais, que formam uma junta de configuração preestabelecida ou o recobrimento de uma superfície também conhecida.

A adição de metal se faz necessária num amplo campo de domínio da soldagem, onde se considera na especificação de seus procedimentos: a acessibilidade, projeto da junta a ser soldada, parâmetros e variáveis processuais que possam conferir a geometria e a qualidade desejada à solda.

O processo TIG produz soldas de alta qualidade com baixo índice de defeitos [1]. Porém, devido ser aplicado geralmente de forma manual, resulta em baixa produtividade e elevados custos associados ao consumo de gás e mão de obra, além de exigir elevada habilidade manual do soldador, sendo a solda de raiz de difícil repetibilidade devido ao nível de treinamento do soldador, por questões da preparação da junta ou do envelope de parâmetros processuais envolvidos etc [2].

Neste trabalho aplicou-se o processo TIG arame frio, em casos e condições distintas, em termos de material e dimensão na configuração da junta para a soldagem de raiz mecanizada em tubos com passe retilíneo. Contudo, foi reconhecida a grande flexibilidade e adequação do processo TIG em diversificadas aplicações, na medida em que a este é incorporada

a mecanização necessária, pois é possível desenvolver procedimentos com objetivos diversificados como fundir, refundir, revestir, preencher e passe de raiz.

Para entender melhor estas questões é que foram desenvolvidas soldas de raiz nas posições 1G, 5G e 6G neste trabalho, observando a viabilidade e produtividade, empregando-se a mistura de argônio com 5% de hidrogênio, com corrente pulsada e constante, alimentação radial e tangencial e diferentes chanfros em tubos de parede espessa, denominada Schedule, de diferentes diâmetros.

Foi desenvolvida uma bancada para a soldagem de tubos rotacionais e estáticos, e tochas foram adaptadas às injeções radial e tangencial de arame. Houve investigação do posicionamento do arame em relação a direção de ataque do arco de soldagem (pela frente ou por trás) e o surgimento da raiz. Também foram realizados ensaios na bancada plana com diferentes modos de posicionamento e alimentação do arame no sistema arco/poça e foram medidos na geometria do cordão as influências dos fatores de controle processual. A avaliação da eficiência de fusão dos ensaios ajudou a ressaltar diferenças geométricas medidas em macrografias.

Para melhor evidenciar os propósitos deste trabalho explicitaremos os objetivos a seguir.

1.1- OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo geral o desenvolvimento de técnicas para a soldagem TIG, que confirmem um ganho em produtividade, focando futura aplicação na soldagem orbital. Como diretriz, o trabalho deverá ser conduzido de maneira a obter penetração total e repetitividade na soldagem do passe de raiz. De forma paralela, deverão ser abordadas questões referentes à:

- Utilizar mistura gasosa com hidrogênio;
- Soldar com corrente no modo pulsado;
- Melhorar a configuração do chanfro.

1.2- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver sistema TIG arame frio para soldagem de raiz e estudar fenômenos envolvidos.
- Adaptar e verificar o desempenho de uma tocha de soldagem TIG para alimentação automática de arame radial e tangencial.
- Realizar ensaios comparativos com diferentes posições de alimentação de arame no processo TIG.
- Verificar a produtividade do processo, seja mediante o aumento da corrente de soldagem, seja pelo emprego de misturas comerciais com hidrogênio as quais configuram em métodos que promovem o aumento de VS bem como novas configurações de chanfro.
- Desenvolver bancada para possibilitar a soldagem de tubos.
- Relacionar energia empregada no processo e a geometria do cordão.

2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta revisão, atende-se a os trabalhos traduzidos, em parte, no conhecimento pré-existente em torno da soldagem de raiz TIG com alimentação automática do arame frio, mas deve-se ressaltar que a maior parte dos conteúdos descritos apresenta certo ineditismo em sua abordagem. A exemplo desta seção, em que se empregou relatórios internos do LABSOLDA com ensaios de soldagem com diferentes gases e de ensaios realizados em outros laboratórios também, embasando desta forma a produtividade do processo TIG com a mistura de gás argônio com hidrogênio. Adotou-se também o fator de forma, método pouco divulgado, no julgamento dos parâmetros com relação ao padrão morfológico do cordão de raiz. Na seção 3 é mostrado o desenvolvimento de bancada inédita e de tochas a empregar nos ensaios. E na seção 4 o amplo emprego de ensaios com alinhamento ortogonal ou fatorial na medição de interações entre variáveis controláveis no processo e as alterações provocadas pela mudança de nível dessas, verificadas através de medições, nas características morfológicas associadas às soldas de raiz em tubos e de cordões em chapas configurando assim análises de técnicas na soldagem TIG mecanizada.

2.1- CARACTERÍSTICAS DO ARCO TIG

Muitos fatores são observados no arco TIG, as quais se podem destacar: o comportamento com a tensão, com o comprimento de arco, com a variação da tensão com o gás empregado, o comportamento da tensão com a corrente pulsada, a influência da variação da tensão na potência do arco, a influência da corrente na variação das isoterms do arco, a variação da pressão de arco com a intensidade de corrente, a perturbação da tensão com a alimentação do arame no arco, entre outros.

2.1.1- Característica Estática do Arco TIG

As características estáticas do arco TIG, são mostradas no diagrama da Figura 2-1, determinados a partir de experimentos produzindo-se arco sem fusão em placa de cobre, empregando o gás argônio comercial, em que se variou o comprimento de arco em 2, 4 e 6 mm, havendo o registro da tensão e da corrente [3].

O comportamento Ôhmico da curva compreendida acima de 50-70 A é mostrado pela linearidade da tensão na medida em que se atribuiu

distintos valores para a corrente, devido haver calor suficiente para que o comportamento resistivo do gás que durante a condução torna-se praticamente uma constante, mantendo os valores de corrente e tensão de forma estável. Porém na faixa inicial de uso da corrente até 50 A, a resistência elétrica do meio composto de uma coluna de gás dielétrico é fortemente dependente da temperatura, fazendo com que a tensão tenha valores altos registrados a baixas amperagens, dificultando a ionização do arco denotada por sua ignição [4] [3].

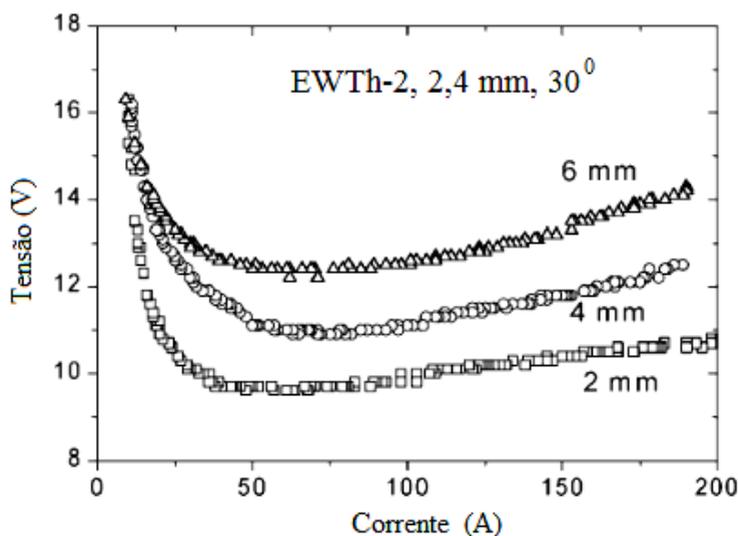


Figura 2-1– Curvas características do arco TIG quando se emprega o gás argônio para três comprimentos de arco em 2, 4 e 6 mm [3].

Conforme se observa estas curvas caracterizam comportamentos distintos para diferentes comprimentos de arco para um mesmo gás. Para correntes menores que 50 A, a tensão do arco apresenta um comportamento aproximadamente exponencial, e a direita de tal ponto, na medida em que a corrente aumenta a tensão entre o cátodo e o ânodo se verifica um sensível crescimento linear. Nesta condição, é comprovado experimentalmente que o arco é mais estável [3,5].

2.1.2- A distribuição de temperatura do arco TIG

As isothermas ou linhas de contorno com temperatura constante do arco TIG são mostrados na Figura 2-2. Obtidas com o comprimento de arco em 5 mm, corrente constante de 100 A, ângulo da ponta do cátodo em 60° e gás de proteção argônio puro com 10 l/min de vazão. São mostrados a distribuição de temperatura medida por HADDAD [6], por linha pontilhada estimadas por FAN [7]. A temperatura de contorno, linha contínua, de 8000 K e no pico em 15200 K são a estimativa calculada do valor medido em espectrômetro para o referencial no arco. No limite entre o arco e a peça, na dita região anódica a temperatura se distribui sobre a poça, e é estimada na superfície, segundo FAN, em 5000 K.

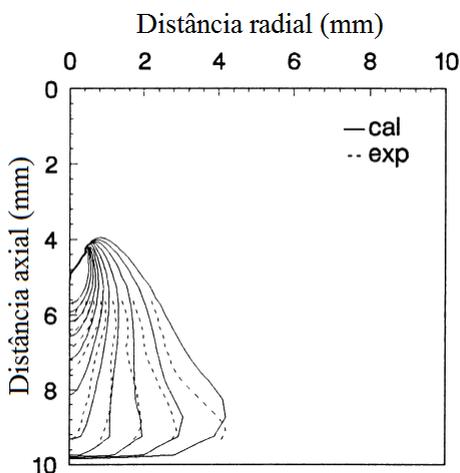


Figura 2-2 – Temperatura de contorno (10000 a 20000 K) do arco.

2.1.3- Sopro magnético e deflexão do arco

O "Sopro Magnético" é um termo usado para o desvio lateral ocorrido nos processos de soldagem a arco, que tem a sua ocorrência dada devido à distribuição irregular do campo magnético em torno do eixo do arco, e a formação de um caminho preferencial para as descargas elétricas, fazendo com que a força magnética passe a ter um componente transversal ao eixo do arco desviando-o lateralmente [8].

A Figura 2-3, mostra que o processo de descargas elétricas do cátodo para o ânodo pode ser perturbado pela formação de ponto anódico, o qual se trata de um ponto na superfície da peça preferencial à descarga

elétrica podendo desviar o arco de soldagem, se a rigidez do arco não for robusta, prejudicando o controle da fusão localizada na linha de solda. De modo geral, é possível contornar os efeitos do sopro magnético, tomando-se algumas medidas como: a diminuição do comprimento de arco, o enrijecimento do arco, a movimentação do eletrodo, inclinações e tecimentos, alteração do caminho percorrido pela corrente no circuito através da variação da posição do(s) cabo(s) e o emprego de corrente alternada que devido à mudança de polaridade minimiza este fenômeno [9].

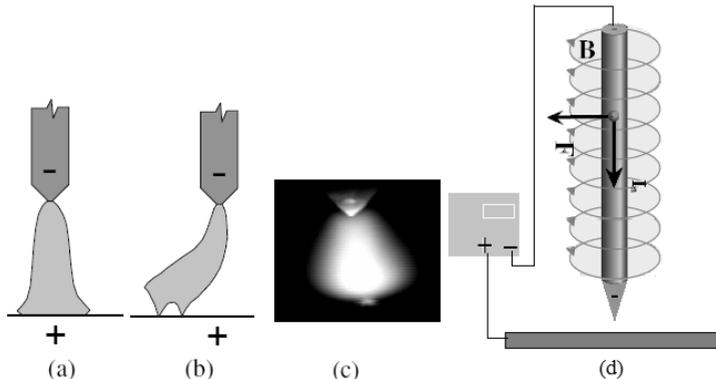


Figura 2-3 – Arco TIG: (a) com ânodo difuso; (b) com anodos pontuais; (c) com ponto anódico; (d) Elementos da força de Lorentz no circuito [8].

Na soldagem de raiz em tubos, o eletrodo se interpõe entre as laterais do chanfro e pequenos desalinhamentos podem ocorrer devido ao movimento relativo entre o eletrodo e o canal na peça, fazendo com que altere a configuração do arco levando-o à ocorrência de descargas laterais ou sopro magnético. Esse desvio de arco diminui o calor na raiz alterando o resultado da solda. Quando o passe de raiz for com alimentação de arame, a solda pode resultar em convexidade excessiva ou reforço na face com baixa molhabilidade, em detrimento do reforço na raiz ou da penetração. O desvio lateral do arco pode provocar a fusão indesejada das superfícies laterais do chanfro ou nas margens da solda.

O uso de telas de gás no bocal da tocha (Figura 2-4) proporciona um escoamento mais homogêneo do gás de proteção, facilitando a ionização e sustentação do plasma [10]. É muito empregado quando se usa correntes baixas, ou deseja-se assegurar um bom desempenho do gás na proteção da poça, ignição e reignição de arco. Um dos problemas em usar lentes de gás em bocais TIG é de que a superfície da peça deve estar

isenta de óxidos, sob a advertência de contaminar a lente de gás e haver a perda da proteção atmosférica.

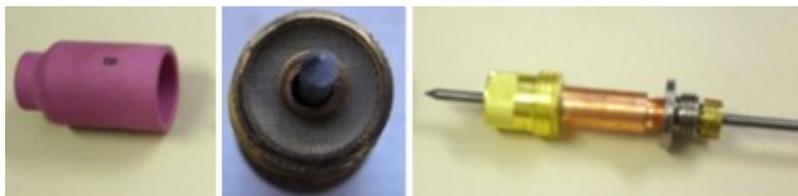


Figura 2-4 – Bocal TIG com porta eletrodo e tela de gás “gás lens”

Segundo Vilarinho, (2009), na medida em que se aumenta a VS o arco fica mais suscetível à deflexão, porque as descargas formam uma espécie de ponte entre o arco elétrico e a peça, e nestes casos se recomenda o aumento da rigidez do arco para estabilizar o processo[9]. Uma melhoria da rigidez do arco pode ser obtida com o aumento da intensidade da corrente ou com uso de corrente pulsada.

2.1.4- A densidade de corrente no arco TIG

O arco TIG apresenta uma configuração geométrica que lembra uma distribuição gaussiana para representar a densidade de corrente. O eletrodo de tungstênio é um metal com a temperatura de fusão estimada em 3422°C . Ao se adicionar de 1 a 2% de terras raras ou radiativos como o lantânio (2,0%), cério (2,0%) e tório (2,0%) à composição do tungstênio por dopagem, estes promovem a melhoria da emissividade termiônica, sendo indicados ao uso de corrente constante com o cátodo negativo. Esta técnica resulta no aumento da densidade de corrente devido ao aumento do fluxo de elétrons, a partir do momento em que é atingida a temperatura de emissão.

A Figura 2-5 mostra que para a corrente de 100 A e comprimento de arco em 3 mm, a densidade de corrente pode variar com o ângulo da ponta do eletrodo. Para os ângulos de 30° , 60° e 90° observa-se diferentes curvas, sendo que na linha central o valor máximo para a densidade de corrente é alcançada, e na medida em que se afasta radialmente, a densidade de corrente vai diminuindo [7].

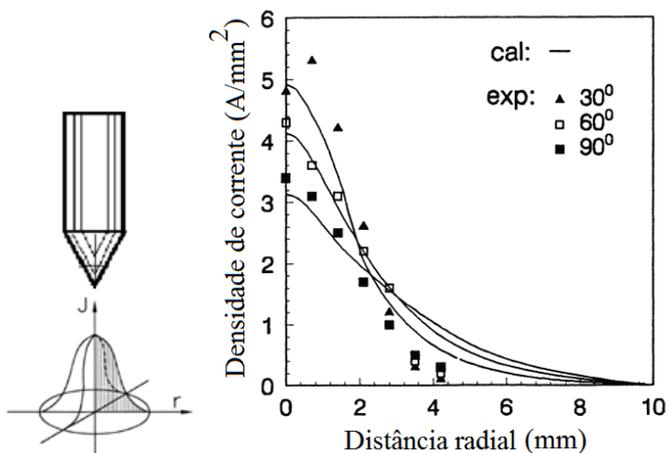


Figura 2-5 – Efeito do ângulo do vértice do cátodo na densidade de corrente do arco no ânodo [7].

Observa-se nas Figura 2-6 e na Figura 2-7 que a densidade de corrente aumenta com o valor da corrente empregada e diminui com o aumento comprimento de arco, considerando-se a linha central, e decai na medida em que se afasta do centro simetricamente distribuindo-se na região anódica.

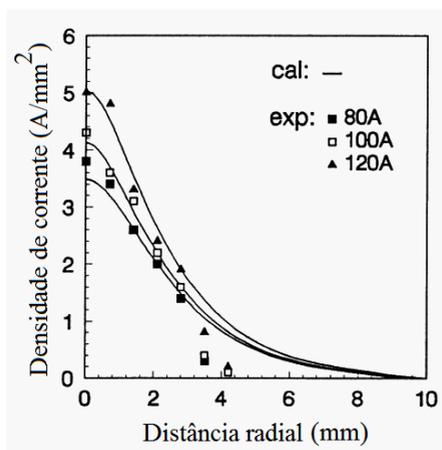


Figura 2-6–Efeito da corrente na densidade de corrente no arco TIG [7].

A densidade de corrente refere-se a um fluxo de cargas que atravessam uma superfície de controle, sendo que este fluxo é mais intenso na região central do arco e próximo a ponta do eletrodo e apresenta um decréscimo na região anódica, assim, aumenta com a diminuição do comprimento de arco [7].

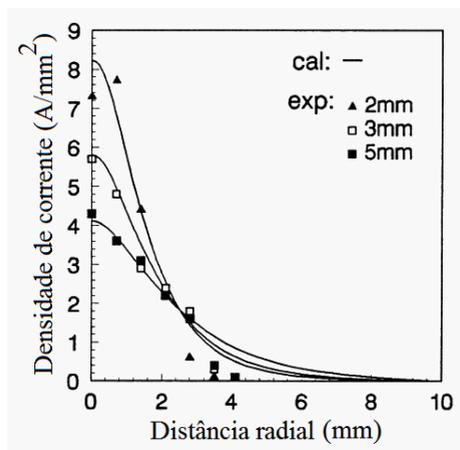


Figura 2-7 – Efeito comprimento de arco na densidade de corrente [7].

2.1.5- Efeito do ângulo da ponta do eletrodo na penetração da solda

SAVAGE et al., (1965), apud KOU [11] observaram que sob a mesma corrente de soldagem, velocidade (VS) e comprimento de arco, a razão penetração/largura de uma solda aumenta com o aumento do ângulo do vértice do cátodo.

Posteriormente, KEY (1980) apud KOU [11] examinou o efeito de ambos, do ângulo do vértice da ponta do eletrodo e a composição do gás de proteção na razão penetração/largura da solda.

GLICKSTEIN (1982) apud KOU demonstrou com fotografias que o arco torna-se mais constricto à medida que o ângulo da ponta cônica do eletrodo de tungstênio aumenta. Os resultados estão na Figura 2-8, que foi adaptada para este trabalho.

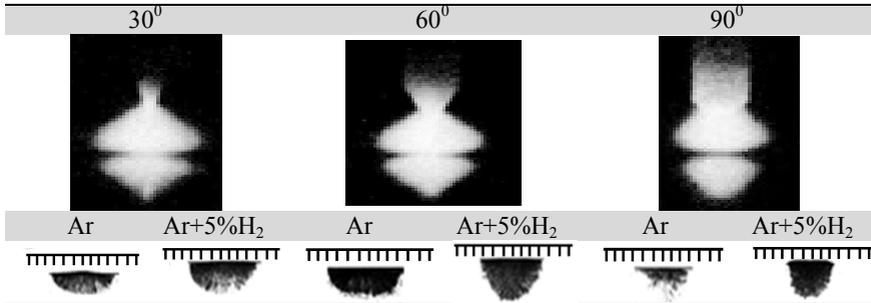


Figura 2-8 – Adaptada dos perfis da zona de fusão como função da geometria da ponta do eletrodo e do tipo de gás de proteção. De Key apud. © 1980 AWS [11].

Em recente figura publicada no primeiro Welding Journal em português [10], mostra que existe um efeito muito próximo na penetração/largura com eletrodo apontado em 60° e o apontado em 90° para o gás Ar.

2.1.6- Potência específica

A densidade de energia associada a cada processo de soldagem pode direcionar a sua aplicação [12]. A Figura 2-9 mostra que se a condução de calor é muito grande no material a soldagem poderá ser impossível se a potência específica for pequena.

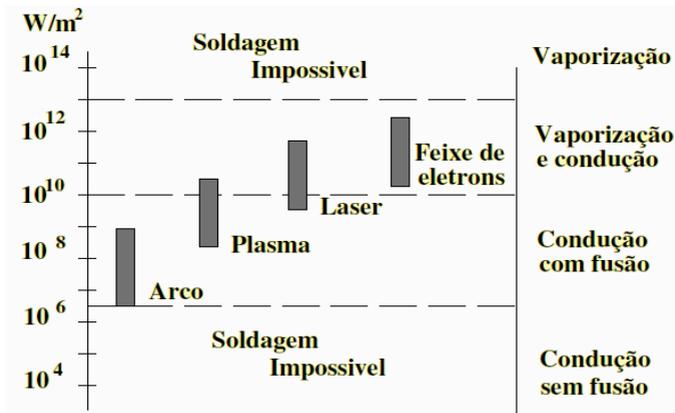


Figura 2-9 – Potência específica segundo processo e aplicação [12].

Então a soldagem só é possível quando certa região é fundida existindo condução de calor inevitavelmente, e que dependendo das características geométricas desta região, pode-se associar ao processo que a gerou. Ao se concentrar o calor de forma que a densidade de energia seja elevada a ponto de vaporizar o metal, a condução será pequena e o processo será adequado ao corte e não a soldagem. A potência específica ou densidade de potência de um arco TIG na ordem de centenas de amperes situa-se em 10^8 W/m^2 .

2.1.7- Gases de Proteção

Os gases de proteção são de grande importância na soldagem. Gases inertes de elevada pureza são utilizados na soldagem TIG como o argônio e hélio, ou mistura de ambos. A mistura de argônio com hidrogênio configura em uma escolha que pode elevar a produtividade na soldagem, porque seu custo é inferior ao do gás hélio, entretanto verifica-se em soldas TIG que o volume fundido é aproximadamente equivalente, e se comparado com o gás argônio puro observa-se grandes diferenças morfológicas na solda gerada considerando a mesma corrente e VS. A escolha de um gás dependerá da aplicação quanto ao tipo de material e o controle desejado da poça.

Entre as muitas funções do gás de proteção no arco TIG, destacamos a proteção da solda contra agentes contaminantes presentes no ar atmosférico. Outra função é evitar a oxidação ao se empregar o gás como purga na raiz da solda. A principal função de um gás de proteção é a geração de um plasma que promova grande transferência de energia térmica aquecendo e fundindo localizadamente a junta a ser soldada. O estudo das características do arco em razão do emprego de diferentes tipos de gases [2], direcionado a diferentes aplicações em materiais resultam na melhoria da eficiência dos trabalhos no campo da soldagem. Destacam-se algumas propriedades físicas dos gases que podem influenciar na eficiência de fusão, como densidade, potencial de ionização, condutividade térmica e elétrica.

A Figura 2-10 mostra que a taxa de fusão do metal de base, em kg/h, aumenta na medida em que se eleva o percentual de hidrogênio ao gás argônio, para distintas faixas de corrente.

Para as curvas mostradas neste diagrama, manteve-se fixo a VS em 0,3 m/min. e o comprimento de arco em 3,5 mm, para os três valores de corrente (150, 200 e 250) A.

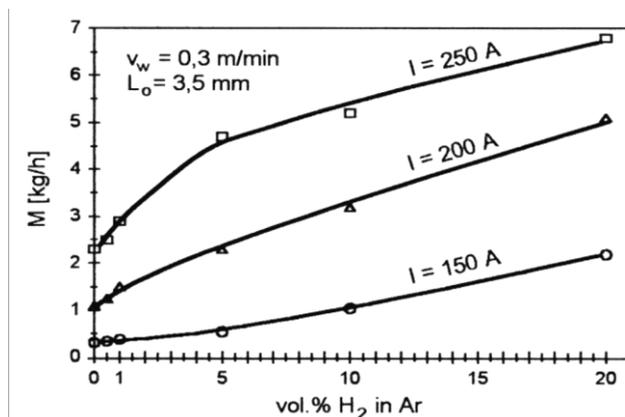


Figura 2-10 – Taxa de fusão do metal base por acréscimo de hidrogênio misturado ao Argônio [13].

Em experimentos preliminares realizados com dois tipos de gases (Ar, Ar+5% H₂), ao empregar corrente contínua constante, adotou-se um critério baseado na geometria do cordão que se denominou fator de forma (ff), definido como a razão da largura da raiz (Lr) pela largura do cordão medida na face (Lf)[14], Equação 2-1.

$$ff = Lr/Lf \quad \text{Equação 2- 1}$$

Apesar do fator de forma ser um critério útil, os resultados mais importantes destes experimentos são mostrados por contraste, porque a mistura Ar+5% H₂ libera maior potencial térmico e funde um maior volume de material, considerando-se a mesma corrente de soldagem. Observa-se na Tabela 2-1 que devido ao fator de forma ser maior para a mesma corrente média indica que a VS neste caso pode ser superior ao dobro se comparados o desempenho dos gases, argônio puro e a mistura de argônio com 5% de hidrogênio, na soldagem de raiz autógena do aço inoxidável AISI 304 com 1 mm de espessura.

Tabela 2-1 – Produtividade entre dois gases na soldagem de raiz TIG autógena do aço AISI 304 com 1 mm de espessura [14].

Argônio Puro				
I (A)	VS cm/min	LR (mm)	LF (mm)	Fator Forma = LR/LF
30	18	1,2	2,2	0,54
Argônio + 5% H ₂				
I (A)	VS cm/min	LR (mm)	LF (mm)	Fator Forma = LR/LF
30	35	1,9	2,6	0,73

Como a adição do hidrogênio está se tornando uma prática sustentável na soldagem, contudo, é prudente saber que o gás hidrogênio é inodoro e altamente explosivo e que sua chama é incolor e a partir de 10% de sua concentração na mistura com o gás argônio, podem ocorrer facilmente o surgimento de poros, devido ao seu aprisionamento na poça solidificada. TUSEK, J e SUBAN atribuem à elevação da condutividade térmica do arco em razão do incremento de hidrogênio no gás argônio, como fator principal no aumento da concentração de energia [13].

As misturas gasosas as quais geralmente influenciam na tensão do arco, trazem ganho em potência a este, entre outras características que podem resultar na melhoria da produtividade. A Tabela 2-2, exibe que para um mesmo valor de corrente média (153 A) e de comprimento de arco (3 mm), verifica-se a variação na tensão média do arco de soldagem, a partir do gás argônio e respectivos percentuais a este adicionados dos gases hidrogênio (H₂) e hélio (He) em 0%, 2%, 5%, e 10% [9].

Tabela 2-2 – Variação da tensão, com misturas de gás com argônio[9].

Ar	0%		2%		5%		10%	
	U(V)	I(A)	U(V)	I(A)	U(V)	I(A)	U(V)	I(A)
H ₂	12,6	153	13,7	153	15,8	153	18,5	153
He	12,6	153	12,7	153	12,9	153	13,1	152

O efeito de constrição no arco devido às misturas gasosas pode ser visualizado nas imagens de arcos da Figura 2-11, nota-se que com o aumento de hidrogênio ou de hélio ao gás argônio o arco apresenta diminuição da conicidade [9].

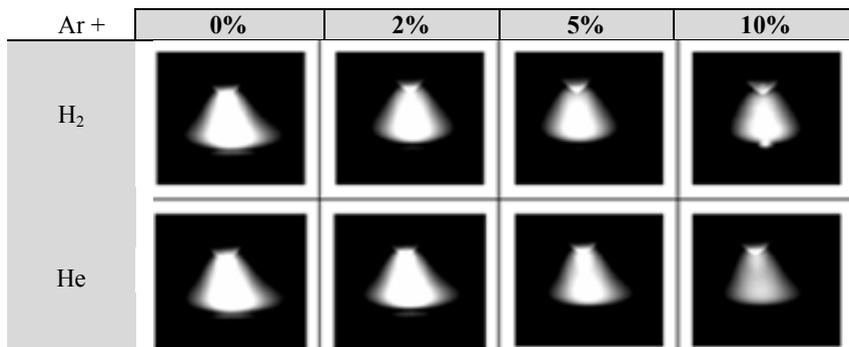


Figura 2-11 – Imagens de arcos com diferentes gases[8].

Então para no processo TIG (DCEN) se a conicidade do arco diminuir, incorrerá que o diâmetro anódico também diminuirá.

O diâmetro da poça gerada por um arco sem movimento resultará superior ao diâmetro anódico deste. Da mesma forma que, havendo movimento relativo, e aumentando-se VS, a largura da face da solda será menor em relação ao diâmetro anódico, efeito devido às diferenças de temperatura medida radialmente no arco, na região anódica, mostrados nas Figuras 2-5; 2-6 e 2-7. Assim o diâmetro do arco na região anódica é fundamental para a dedução da área do arco e sua relação com a área medida na superfície da poça e o cálculo da potência específica ou densidade de potência, Figura 2-9.

Na Figura 2-12, aponta-se que para o comprimento de arco for 3 mm e empregar-se o gás argônio puro com uma corrente de 153 A o diâmetro anódico é de 3,75 mm havendo uma redução de 36 % no valor deste diâmetro se adicionarmos 10% de hidrogênio e de 31% se for 5%. Porém, isso não quer dizer que a poça terá o seu diâmetro contraído na mesma proporção do diâmetro do arco.

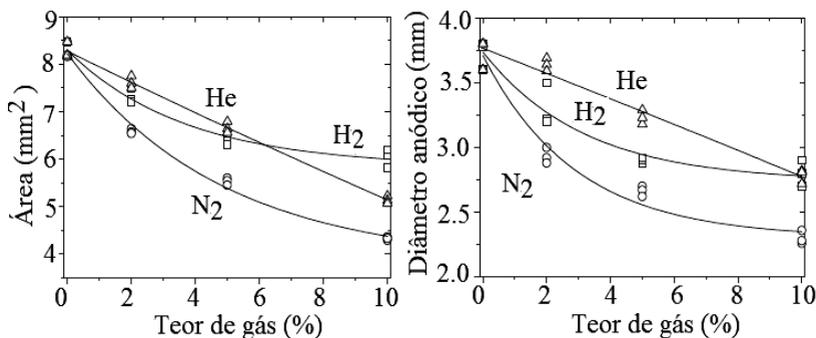


Figura 2-12 – Variação da área do arco e do diâmetro anódico para diferentes misturas, EWTh-2, 2,4 mm, 90° vértice do cátodo, DEP=3 mm [9].

Então a constrição do arco é influenciada pela composição da mistura do gás de proteção, o que pode alterar o tamanho da poça de fusão[8].

2.2- TÉCNICAS DE SOLDAGEM TIG E ASPECTOS DA PRODUTIVIDADE

A soldagem TIG é uma das mais importantes tecnologias empregadas na fabricação com relação à união por solda. Esta tecnologia de soldagem é aplicável para a maioria dos metais, incluindo a soldagem

de tubos de aço carbono utilizado, por exemplo, na construção de plataforma de petróleo “*Offshore*”, como também na soldagem de raiz de elementos estruturais[1].

Muitas técnicas TIG podem ser aplicadas para obter um ganho em produtividade, dentre estas possibilidades encontra-se as variantes processuais TIG. Citaremos aqui alguns aspectos limitantes da produtividade TIG e outros para a melhoria desta.

Quando a VS é aumentada a penetração em média diminui. Acima de um valor crítico, dependendo dos parâmetros de soldagem selecionados, nenhuma solda contínua pode ser mais alcançada [15].

Quando se emprega na soldagem TIG sem adição de arame, correntes acima de 250 A, no limite da VS pode ocorrer a solidificação descontínua do cordão conhecida como costa de dragão [16], limitando dessa forma a sua produtividade. Supõem-se três fatores relacionados com este problema: a elevada pressão de arco devido a correntes elevadas e a convecção da poça; e a ausência de metal adicionado à poça.

Com base nessas experiências, várias tochas TIG podem ser empregadas na soldagem a arco, como por exemplo, tochas multicátodo com montagem alinhada, conhecidas como “*Tandem*” ou tochas siamesas conhecidas com “*Twin*”. Tais técnicas estão embasadas em uma distribuição mais uniforme da pressão do arco por empregar maior número de eletrodos, e é comum associar-se também à adição de arame à poça.

Outra forma de aumentar a produtividade na soldagem TIG DCEN, consiste em pulsar a corrente de soldagem em frequências elevadas. O aumento na frequência de pulsação da corrente pode promover um aumento considerável na VS na soldagem de chapas finas, nas faixas de espessuras de até de 2,0 mm, do material, este método de soldagem pode representar uma interessante alternativa de baixo custo se comparado à soldagem LASER [15].

Ao empregar-se a corrente contínua pulsada, é possível estabelecer um maior nível de controle para a penetração, fator de grande relevância na soldagem de raiz. Isto se deve ao mecanismo de atuação da potência do arco, denotado pelo nível e tempo de atuação da corrente, como por exemplo, ao operar-se com a corrente de pulso em um nível mais elevado, mas atuando por um tempo insuficiente para permitir a perfuração do material [14], se pode obter um melhor controle da porção fundida no material.

Em uma representação gráfica para a corrente contínua pulsada, observa-se o ciclo compreendido entre a ignição e a extinção do arco, Figura 2-13.

Inicialmente a corrente assume um valor inicial (I_i), para um determinado tempo (t_i), em seguida estabelece uma rampa, denotada pelo tempo de subida da corrente (t_s), até atingir a corrente um valor de pico (I_p). Por seguinte, a corrente entra em um ciclo oscilante entre valores de pico (I_p) e de base (I_b) em intervalos de tempo denominados, respectivamente, de pulso (t_p) e de base (t_b). Ao fim da soldagem a extinção do arco é precedida por uma rampa de descida, decorrido no tempo (t_d), e finalmente a corrente de finalização (I_f) decorrida no tempo de finalização (t_f) e extingue-se o arco [5].

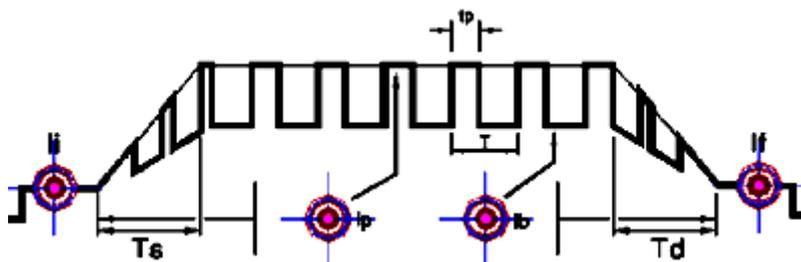


Figura 2-13 – Forma de onda da corrente no processo TIG pulsado [1].

Nas operações de soldagem com corrente pulsada, após certo período de pulso, a corrente deve ficar num patamar baixo o suficiente para manter o arco e por um período longo o suficiente para permitir a contração da poça de fusão. Devido a esta característica, a corrente pulsada é uma técnica praticada na soldagem fora de posição à baixa frequência de pulsação (de 2 a 10 Hz). Quando a frequência de pulsação for elevada, no limite esta se aproximará da corrente constante, em termos dos efeitos sobre a solda.

Pode-se regular o tempo e a amplitude da corrente no pulso e na base. Em baixa, média e a alta frequência, dependendo da amplitude ajustada para a corrente, podem-se realizar soldas com incremento em produtividade [15], dependendo da aplicação.

Na soldagem TIG, quando se utiliza uma frequência de pulsação da corrente na ordem de algumas unidades de kHz, o arco elétrico sofre uma constrição, ou seja, aumenta a potência específica por redução da área havendo um aumento da densidade de energia, que possibilita a formação de cordões mais estreitos e profundos. Esse efeito inicialmente é percebido entre 2 e 6 kHz, havendo o aumento considerável da rigidez do arco. Isso permite empregar maiores velocidades de soldagem e conseqüentemente a redução de custos.

O método da alta frequência no processo TIG é principalmente usado na soldagem de chapas finas com baixa amperagem por tornar o arco mais robusto, permitindo empregar maiores velocidades de soldagem [15].

2.2.1- Efeito da pulsação na solda

A razão cíclica é uma medida corresponde à relação entre o tempo de pulso (t_p) e o período da forma de onda da corrente ($t_p + t_b$), conforme a Equação 2-2.

$$Rc = t_p / T \quad \text{Equação 2-2}$$

Pequenos períodos de pulsação irão implicar correntes pulsadas de frequências elevadas, o que exigirá do equipamento de soldagem uma arquitetura de circuitos e de componentes eletrônicos especialmente projetados para atingir os parâmetros desejados no pulsado, como a constrição do arco.

A pulsação do arco voltaico à média frequência pode ser obtida pela pulsação da corrente de soldagem a qual poderá promover o refino na microestrutura da solda. Isso é possível quando a frequência de pulsação é capaz de proporcionar uma agitação na poça de fusão. Tal fenômeno, segundo DZELNITZKI (2000)[15], pode ocorrer com frequências na ordem de 100 Hz.

Na baixa frequência até 5 Hz, por exemplo, observa-se a contração da poça pois o ajuste da corrente na fase de base controlará o tempo de esfriamento da poça e o ajuste da corrente na fase de pulso controlará o derretimento do metal [17][15]. Este mecanismo é empregado no controle da sustentabilidade da poça fluida na soldagem fora de posição, como ocorre na soldagem orbital.

A frequência de pulso, caso selecionada acima de 6 Hz, não resultará em uma diferença de temperatura observada no intervalo entre o tempo de pulso e o tempo de base da corrente, e o efeito em termos da contração da poça, será similar ao da corrente não pulsada na soldagem TIG [15].

A constrição do arco é importante, pois o formato em boca de sino Figura 2-14, característico do arco TIG, faz com que a pressão específica diminua. Este fato é tão relevante que originou o processo Plasma que apresenta grande similaridade com o TIG, porém o formato do arco se

aproxima da forma cilíndrica que dependendo do raio da base influência o valor da densidade de potência.

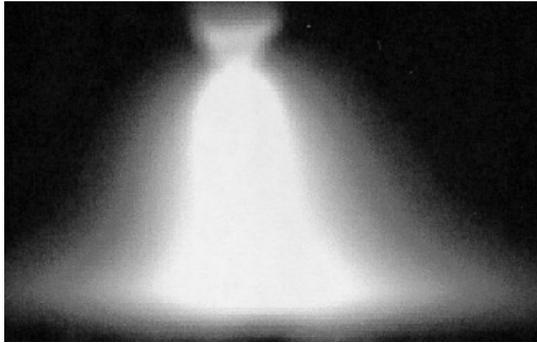


Figura 2-14 – Arco TIG com 2 kHz de frequência de pulsação [15].

2.2.2- Considerações sobre a corrente pulsada

A corrente estabelecida, média, é dada por uma média ponderada, onde os fatores são os tempos de pulso (t_p) e de base (t_b), conforme a Equação 2-3.

$$I_m = (I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b) / T \quad \text{Equação 2-3}$$

Assim como a corrente média a potencia média pode ser estabelecida conforme a equação, Equação 2-4

$$P_m = (U_p \cdot I_p \cdot t_p + U_b \cdot I_b \cdot t_b) / T \quad \text{Equação 2-4}$$

O tempo de pulso é uma fração do período, cujo tempo de base pode ser tomado como fixo por estar relacionada a energia mínima para garantir a estabilidade do processo. Para o tempo de pulso, muitas vezes, se deseja certo efeito como a penetração, melhoria da rigidez do arco, etc. [15].

Uma condição limitante de uma fonte de corrente para a soldagem TIG é fazê-la operar com corrente contínua pulsada em frequência elevada, pois quanto maior for a diferença da amplitude do pulso para a corrente em relação ao valor da corrente de base, maior será a exigência do projeto da fonte de soldagem para responder a dinâmica imposta aos

circuitos indutores e velocidade de comutação (chaveamento) dos transistores [18].

Porém, como na soldagem de raiz em tubos de parede espessa a faixa de pulsação desejada encontra-se no limite de 6 Hz, não é necessário uma fonte de soldagem com tal sofisticação. Nesta faixa de frequência uma fonte tiristorizada já seria suficientemente rápida para garantir o pulsado.

Quando os tempos de pulsação são iguais entre o período de pulso e o período de base, os ajustes da corrente média (I_m) são facilitados, pois a (I_m) é dada por uma média aritmética das correntes I_p e I_b , o que simplifica a equação.

2.2.3- Descontinuidades de soldagem

No processo de soldagem descontinuidades como poros, trincas, falta de fusão, entre outras, ocorrem através de diversos fatores. Uma solidificação rápida pode levar à formação de poros e até mesmo gerar a descontinuidade conhecida por cavidade alongada. A baixa energia de soldagem pode incorrer em falta de fusão devido a pouca penetração, e o excesso de energia pode gerar cavidade na margem da solda ocasionando a descontinuidade conhecida por mordedura.

Dentre as descontinuidades citadas, a cavidade alongada é um tipo de descontinuidade que pode ser causada devido à concentração de gás (hidrogênio proveniente da mistura) que não solubilizou no metal fundido havendo nucleação e o surgimento de bolhas que podem ser aprisionadas se a frente de solidificação do metal for mais rápida do que a capacidade da bolha de gás em escapar por diferença de densidade, HOOIJMANS apud SCHWEDERSKY [16].

A inspeção visual é muito empregada como critério primeiro ao julgar a qualidade de um cordão de solda diante da ausência de mordeduras, observa-se o ângulo de molhamento ou a razão hr/L , altura do reforço pela largura do cordão como critério para julgar a energia de soldagem bem como a taxa de deposição de arame [1].

Quando um cordão apresentar pouca convexidade e, portanto baixo ângulo de molhamento ou ainda reforço muitas vezes menor que a largura do cordão inferiu que a energia esta alta e a taxa de deposição esta baixa, sob o ponto de vista da aparência do cordão na face da solda.

Uma taxa de deposição bem ajustada deve conferir um cordão de boa aparência, uniforme com altura e largura constante e ângulo de molhamento inferior a 45 graus.

2.3- VARIANTES DO PROCESSO TIG

Entende-se por processo TIG alimentado como uma variante do processo TIG convencional, porém a adição de metal não é mais praticada de forma manual, mas automática, através de um equipamento denominado sistema tracionador de arame.

Basicamente um alimentador de arame consiste em um sistema que dispõe de um eixo suporte para montar a bobina e uma espécie de freio para não permitir que esta siga girando por inércia quando o sistema tracionador parar. Este é constituído de no mínimo dois roletes com ranhura dimensionada de acordo com o diâmetro do arame, a ser tracionado. Obviamente um motor e um controle devem existir permitindo desta forma os ajustes de velocidades, os quais podem ser desde um simples potenciômetro a um moderno micro controlador.

A alimentação do metal de adição pode ser feita por intermédio de conduítes cuja função é a de conduzir o arame até um ponto específico entre o arco e a poça de fusão. Geralmente um alimentador para soldagem TIG compreende a faixa de velocidades entre 0,1 e 7 m/min. [1]. Uma função importante em um sistema de alimentação de arame é este possuir uma rampa de aceleração e de desaceleração para atenuar o problema do começo e do final de um cordão de solda.

Alguns cuidados devem ser observados, ao trabalhar-se com alimentação mecanizada do arame no processo TIG. Um desses começa com a montagem do sistema alimentador, e com a escolha do rolete tracionador. Os roletes que possuem estrias na ranhura são aplicados quando o material do arame for de liga não ferrosa e com a ranhura lisa quando os metais a serem tracionados forem aços em geral. Deve-se ter o cuidado na escolha correta do diâmetro da ranhura do rolete de forma a acomodar perfeitamente o arame escolhido permitindo o ajuste da pressão adequada sobre este e certo atrito entre eles, deve ser garantido.

Conduítes de teflon são empregados para ligas não ferrosas, mas podem também ser usados em aços carbono e inoxidáveis, porque possuem baixo coeficiente de atrito e resistência térmica superior a 300⁰C. Na soldagem com alimentação automática continuada deve-se preferencialmente usar conduítes metálicos, que são mais robustos, quando o arame a ser utilizado exigir maior resistência do sistema de alimentação, devido ao tipo de material, diâmetro, tempo e velocidade de alimentação. Um sistema de alimentação geralmente requer supervisões periódicas [17] [1].

A Figura 2-15 mostra um sistema tracionador de arame e a montagem do condúite de teflon para acoplamento no terminal da máquina de soldagem.

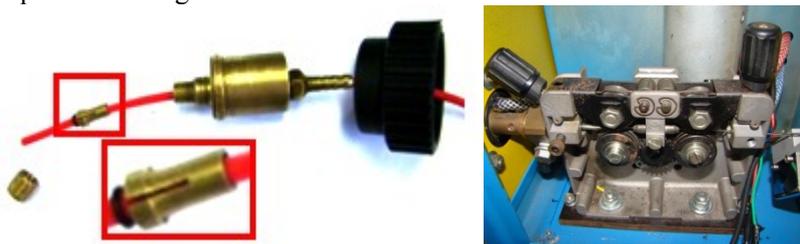


Figura 2-15 – Sistema para mecanização do arame.

Na soldagem manual com o processo TIG a vareta é introduzida manualmente e geralmente na poça, podendo o movimento ser: contínuo; descontínuo ou até mesmo alternado durante a sua alimentação.

Uma alternativa de melhoria da fadiga enfrentada pelo soldador consiste na mecanização da alimentação do metal de adição. Um sistema mecanizado para a soldagem manual, denominado por Caneta TIG que usa o arco como sensor, indica ao sistema controlador se o arame se encontra dentro ou fora do arco. Se o arame estiver fora do arco este avançará com a velocidade que foi previamente ajustada na IHM¹, e ao tocar na poça ele para o movimento de avanço. Este sistema é denominado, adaptativo.

Além das fontes de energia e do alimentador, o projeto de tochas para soldagem é de grande importância, pois é através da tocha que o fenômeno da transformação da energia e sua transferência se processam.

Normalmente as tochas, para o uso de correntes acima de 150 A, são refrigeradas a água e possuem uma unidade para forçar sua circulação. Para a soldagem mecanizada com alimentador de arame, é recomendado o uso de tochas refrigeradas devido à permanência de arco aberto por um tempo maior.

2.3.1- Produtividade do TIG Arame frio (Cold Wire)

O processo TIG arame frio refere-se quando a alimentação do arame é realizada de maneira mecanizada sendo que a sua introdução no sistema arco/poça ocorre à temperatura ambiente durante a soldagem.

¹ Interface Homem Máquina

Muitas são as aplicações da variante TIG arame frio, tais como a soldagem de materiais ferrosos e não ferrosos em procedimentos de soldagem de raiz e de revestimento, na união em juntas de topo e de filete.

Na Figura 2-16, o gráfico da esquerda compara a produtividade do TIG manual com o de alimentação automática, enquanto o gráfico da direita mostra que a VS em cm/min. é inversamente proporcional à espessura da chapa. Vê-se que a produtividade pode ser aumentada em até aproximadamente o dobro com a mecanização da alimentação do arame.

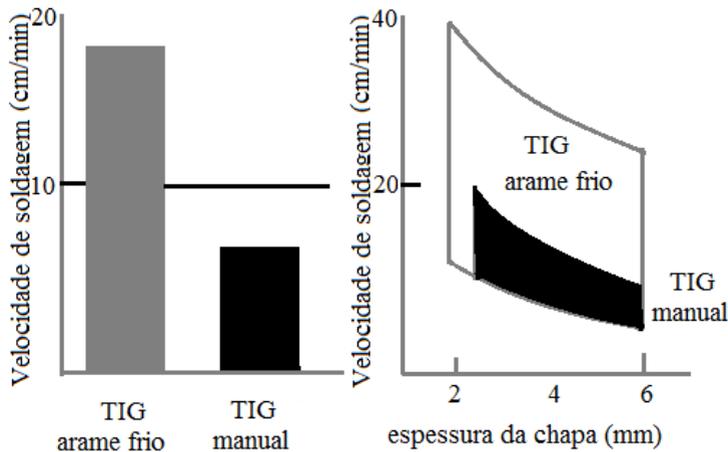


Figura 2-16 – TIG arame frio, comparação manual e automático[2].

2.3.2- Produtividade do TIG arame quente (Hot Wire)

O processo com arame aquecido é empregado com sucesso em deposições com a finalidade de revestimento em aços inoxidáveis e ligas de níquel, cobre e titânio. Geralmente esses procedimentos são realizados com sistemas mecanizados ou automatizados de alimentação do arame.

O preaquecimento do arco é obtido através da passagem de uma corrente elétrica em um pequeno trecho energizado em torno de 40 a 60 mm entre o contato elétrico e o arco voltaico [1]. Devido ao pré-aquecimento do arame em torno de 300-400 [°C], fator que caracteriza esta variante processual do TIG, o arame necessitará de menos energia para fundir, esfriando desta forma menos a poça de fusão. Como a potência do arco é estável, obtêm-se maiores velocidades de alimentação, resultando em maiores taxas de deposição (kg/h), permitindo, assim,

maiores VS em relação ao arame frio chegando a uma taxa de deposição de 2 kg/h com 8000W [2].

2.3.3- O processo TIG arame frio com alimentação tangencial do arame.

O processo de soldagem TIG com alimentação tangencial, comercialmente disponível como TOPTIG, foi desenvolvido para obter um melhor aproveitamento da energia do arco por introduzir o arame em uma região mais conveniente à fusão. Esta tecnologia é um conceito do projeto inovador da tocha [19].

O material de adição é alimentado através do bocal, passando com uma pequena distância da lateral do eletrodo e o arame, cuja alimentação se dá em um ângulo de vinte graus, em relação ao eixo do cátodo.

Na Figura 2-17 (a), é apresentado o esquema da tocha TIG adaptada à soldagem robotizada, e sua limitação em acessar ângulos retos ou agudos. Na mesma seqüência, Figura 2-17 (b), vê-se a tocha com alimentação tangencial realizando a soldagem de filete em junta com ângulos inacessíveis ao outro modelo² [19], Figura 2-17 (C) Foto da tocha.

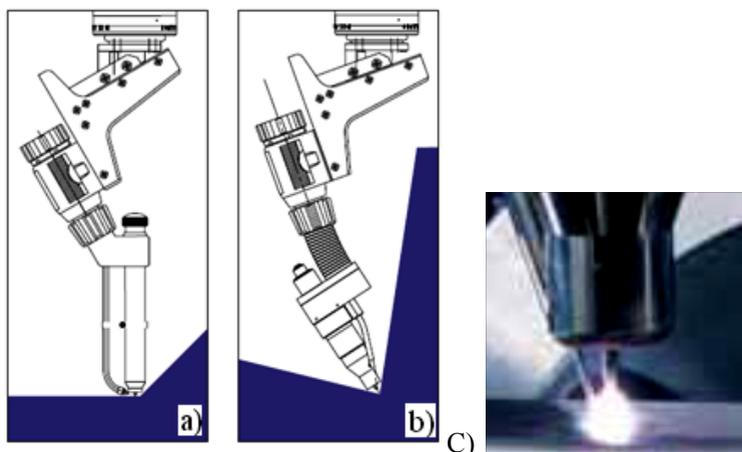


Figura 2-17 – Vantagens da configuração da tocha TOPTIG[19].

A configuração da tocha possibilita a passagem do arame em uma região mais quente da coluna de plasma gerada no arco elétrico, elevando a taxa de deposição do consumível metálico. Tal configuração além de

² Introdução do arame convencional

reduzir as dimensões globais da tocha e aumentar a acessibilidade na soldagem de juntas de geometrias complexas, aumenta também as possibilidades de movimento e permite taxas de deposição comparáveis com o processo MIG/MAG, mas com qualidade do processo TIG [19].

2.3.4- O processo TIG com alimentação do arame radial alternada

No processo de soldagem TIG com alimentação radial alternada, comercialmente conhecida como TIPTIG Figura 2-18, o movimento constante da alimentação de arame de solda é sobreposto por um movimento para trás que se alterna e (ou) um movimento que se sobrepõe com velocidade diferente a de alimentação básica e, portanto secundária. Esta sobreposição de ambos os movimentos fornece energia cinemática na poça de solda.

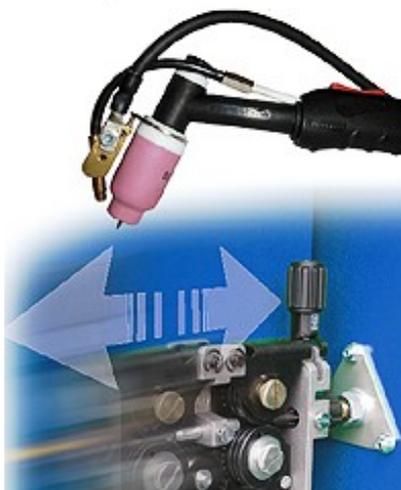


Figura 2-18 – Sistema TIPTIG.

Um dos efeitos dinâmicos produzidos pela pulsação do arame é o de introduzir um adicional de energia mecânica na poça, forçando sua convecção, que favorece a fusão permitindo que impurezas e gases escapem havendo inclusive a possibilidade de empregar maiores taxas de deposição em virtude disso.

A velocidade de alimentação do arame, bem como o movimento de oscilação, são regulados e independentemente controlados por um microcontrolador. Desta forma é possível soldar juntas em ângulo com em todas as posições, com baixo aporte térmico, conferindo melhores

propriedades metalúrgicas ao metal depositado devido à dinâmica na alimentação do arame. A técnica pode ser aplicada a todos os materiais soldáveis a arco.

2.4- O PROCESSO TIG NA SOLDAGEM ORBITAL E CABEÇOTES ROTACIONAIS.

O projeto de tochas TIG, Figura 2-19, associados aos dispositivos de trajetória e de posicionamento, tem conferido grande versatilidade a esse processo, incluindo soldas em espelhos de caldeiras, no revestimento interno de tubos e na soldagem de topo de tubos entre outras aplicações.

A soldagem orbital TIG consiste em fazer com que o eletrodo de tungstênio execute uma trajetória coerente em torno de uma superfície geralmente circunferencial e com acesso pela periferia externa. Soldas de alta qualidade e repetitividade podem ser alcançadas no limite da velocidade máxima de soldagem [20].

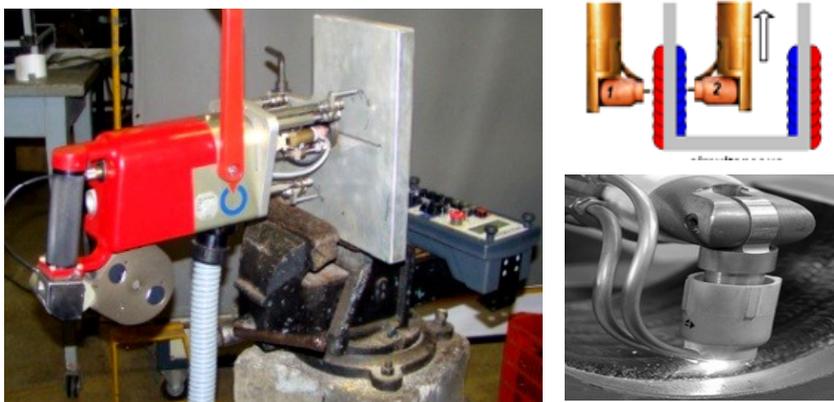


Figura 2-19 – À esquerda soldagem típica de tubos em espelho de trocador de calor e a direita soldas de revestimento em vários casos.

Nas diferentes configurações assumidas pelos dispositivos especialistas para a soldagem externa orbital, podemos destacar:

a) Cabeçote orbital de câmara fechada

Este tipo de cabeçote possui um sistema de fixação e alinhamento dos tubos que ao ser fechado, cria um ambiente que enclausura toda a região a ser soldada. Este ambiente, onde ocorre a soldagem, é totalmente

preenchido com gás inerte de modo a proteger a poça de fusão e o eletrodo[5]. Sua principal aplicação é na soldagem de tubos de parede fina, geralmente inoxidáveis, titânio e alumínio cuja configuração da junta é de topo e o procedimento é sem a adição de arame, ou seja, autógeno.

b) Cabeçote orbital de câmara aberta.

Os cabeçotes orbitais de câmara aberta, arco não enclausurado, são indicados para tubos de paredes espessas, porque se faz necessária a adição de material para promover o enchimento ou nivelamento da região chanfrada. Além disso, neste tipo de cabeçote à distância entre o eletrodo e a peça pode ser controlada por um AVC³. Os cabeçotes de câmara aberta são empregados na soldagem de tubos na faixa comercial de 50 mm a 250 mm de diâmetro, desde que permitam portabilidade do dispositivo. A Figura 2-20 exhibe tal cabeçote.

c) Sistema orbital de superfície para tubos de grandes diâmetros

Geralmente são fixados dois segmentos de anéis que se ajustam ao diâmetro do tubo, servindo como trilho para posicionar um sistema trator que conduzirá a tocha de soldagem e o conduto de alimentação. Nestes sistemas, o conjunto orbitará em torno do tubo, sendo importante o uso do sistema AVC para manutenção do comprimento de arco, compensando, assim, as imperfeições e desvios da forma circular dos tubos.

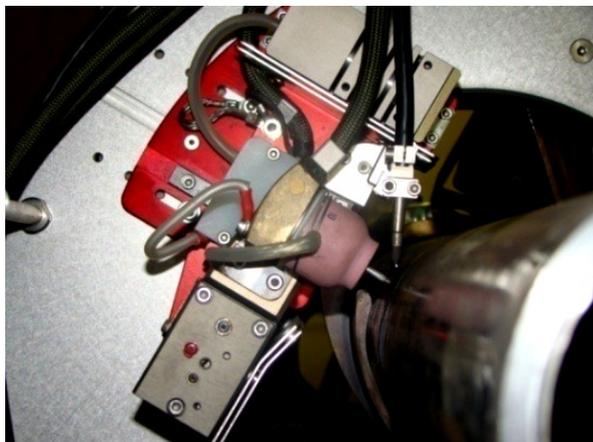


Figura 2-20 – Cabeçote orbital de câmara aberta.

³ Automatic Voltage Control

2.5- CONTROLE AUTOMÁTICO DA TENSÃO: AVC

Para a soldagem de raiz, a precisão dos movimentos do soldador ou do sistema de deslocamento de tocha é um fator importante para o sucesso da operação.

Na soldagem manual o soldador executa todos os movimentos necessários para a manutenção do arco de solda, ou seja, o soldador é um sensor quase perfeito, pois percebe erros e mudanças e atua para corrigi-los. No entanto na soldagem automatizada, é desejável que se tenha algum tipo de correção. No caso da soldagem orbital de tubos, o comprimento de arco deve ser monitorado, pois em geral estes tubos têm algum tipo de deformação (circularidade e excentricidade) ou erros na usinagem do chanfro. O aumento ou a diminuição do comprimento do arco de solda pode comprometer a continuidade do cordão ou influenciar negativamente na penetração.

Para ambos os casos, a tensão é um bom indicativo do comprimento de arco (especialmente no processo TIG). Um aumento de comprimento de arco corresponde a um aumento de tensão e vice-versa.

O AVC é um dispositivo capaz de controlar a tensão ao longo do procedimento de soldagem e sua utilização pode conferir a robustez em termos de repetitividade necessária para uma tarefa tão importante quanto à realização do passe de raiz, num sistema orbital automatizado [20].

As contribuições dos acadêmicos do LABSOLDA muitas vezes culminam em desenvolvimento e melhorias de sistemas e equipamentos.

Uma destas contribuições ficou evidente no trabalho de desenvolvimento de um sistema de controle de altura e de abertura do arco elétrico para o processo de soldagem TIG, o AVC mostrado na Figura 2-21.

Na Interface Homem-Máquina (IHM) é possível regular a tensão do arco elétrico desejada. Durante o funcionamento, o dispositivo realiza a leitura da tensão do arco elétrico e subtrai da tensão desejada, gerando um esforço de controle no dispositivo mecânico acoplado a tocha de soldagem. Este, por sua vez, atua no sentido de afastar ou aproximar a tocha de soldagem com o intuito de manter constante o comprimento do arco elétrico.

Outras variáveis que podem ser reguladas através da IHM do referido equipamento são: a sensibilidade e zona morta. A sensibilidade afeta diretamente o controlador da malha de controle, tendo por finalidade alterar a velocidade com que o AVC corrige a altura do arco. Já a zona morta permite que a tensão no arco varie até certo valor sem que o AVC

atue. As características supracitadas permitem uma maior flexibilidade na sua utilização [21]. No TIG pulsado alimentado, por exemplo, a presença do arame no arco, assim como o crescimento da poça devido a situações desejadas de elevada taxa de deposição, o uso da corrente pulsada, e imperfeições de chanfro e variação do raio são fatores que perturbam o arco elétrico na soldagem de tubos. Então, a correta seleção das variáveis do sistema permite que o arco permaneça estável. Na Seção 4, Figura 4-6, são mostradas algumas regulagens empregadas neste trabalho na soldagem de tubos.

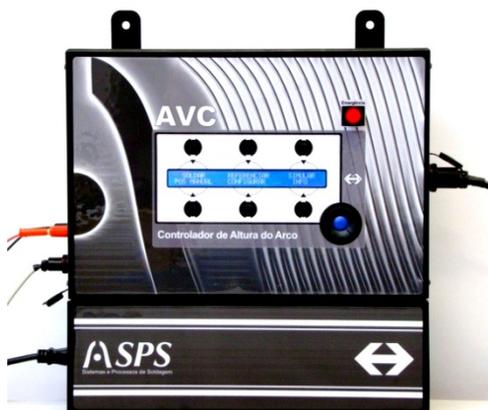


Figura 2-21 – AVC, unidade de controle.

2.6- ASPECTOS DA PRODUTIVIDADE NA SOLDAGEM DO PASSE DE RAIZ E ESTADO DA ARTE.

Um fator limitante da produtividade na soldagem de tubulações deve-se ao tempo de execução do passe de raiz. Isto ocorre porque, os cordões sucessores ao passe de raiz, podem ser realizados com maiores velocidades e maiores taxas de deposição. Então o aumento da VS e a minimização do número de passes para preenchimento da junta, norteiam a pesquisa em soldagem de tubulações, no caminho da melhoria da produtividade focada a aspectos processuais.

Na soldagem manual, o método convencional de execução da raiz com eletrodos revestidos do tipo celulósico (AWS E 7010) é ainda grandemente empregado na soldagem de raiz de tubos API 5L X52 e X60, de grandes diâmetros, mas representam um gargalo na montagem de tubulações, cuja velocidade de execução é limitada pela velocidade e confiabilidade com que é praticado o passe de raiz.

Atualmente passes de raiz podem ser realizados também com processo MIG/MAG na sua variante denominada STT a qual disponibiliza um controle eletrônico da corrente e da tensão de trabalho obtendo-se desta forma um melhor controle do aporte na raiz da junta e uma transferência metálica sem respingos, por tensão superficial, ou seja, a gota é destacada quando está em contato com a poça, sendo esta técnica empregada com limitações. Até recentemente a única alternativa confiável para MIG/MAG ainda é a utilização de um sistema de apoio interno.

No Canadá na montagem de gasoduto, está sendo testado o processo híbrido de soldagem, como o LASER GMAW (Nd: YAG⁴). O processo é conhecido como LASER de fibra, uma vez que emprega fibra ótica como cabo extensível da tocha de soldagem, juntamente com o processo MIG/MAG [22].

Este método de soldagem permite que a penetração da solda seja incisiva na raiz, apesar da elevada espessura, e preenche-se em passe único. Geralmente a potência do LASER Nd: YAG é tido como o de melhor eficiência energética. Para a soldagem dos aços são necessários 10 kW para uma penetração de até 10 mm [23].

O aço baixo carbono e o aço de baixa liga com alta resistência (ARBL) representam materiais de baixo custo e de boa soldabilidade. Esses materiais são muito empregados na construção mecânica e na fabricação de tubos, porém, a soldagem de raiz é crítica, devido à larga escala de emprego e a baixas velocidades dos métodos manuais de execução deste passe ou se mecanizado da baixa repetitividade. Há consenso mundial por empregar aços mais leves e resistentes, reduzindo assim a espessura da junta a soldar sem alterar a resistência desejada, o que minimiza os custos globais em transporte, soldagem, etc.

O processo TIG é aplicado na soldagem de tubulações na execução do passe de raiz com grande frequência a baixas VS. Técnicas de soldagem a alta VS em passe único como K-TIG "*TIG keyholing*", difundida e aplicada principalmente nos laboratórios de CSIRO⁵, na Austrália consiste em um procedimento TIG com alimentação automática do arame frio, conhecida por eletrodo enterrado. Essa técnica pode empregar correntes na faixa de 500-1000 A [1] [24], e atingir VS elevadas em passe único de raiz, com baixa taxa de deposição e com completo preenchimento da cavidade na junta. Soldas em chapas de até 12 mm de

⁴ Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet; Nd:Y₃Al₅O₁₂

⁵ Common wealth Scientific and Industrial Research Organization

espessura, em aço inoxidável, como mostrado na Figura 2-22, são realizadas o qual pode ser considerado como o estado da arte da soldagem de raiz com o processo TIG.

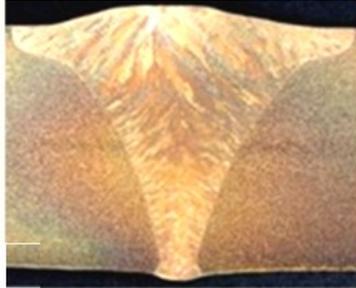


Figura 2-22 – Solda de raiz em único passe com o processo K-TIG[24].

A soldagem em passe único diante do exposto representa um esforço mundial em tornar viável a sua realização. Se por um lado a técnica processual é factível ao controle da energia, por outro lado o projeto da junta é um fator determinante, acomodando o arco e reduzindo o calor aportado na raiz. Um exemplo de soldagem em único passe de um tubo de grande diâmetro e espessura é mostrado na Figura 2-23. O processo capaz de realizar tal solda denominada CAPS⁶ trata-se de MIG/MAG “*Tandem*” com duas tochas com dois eletrodos alinhados em cada uma[22], na soldagem de um tubo API X100 com aproximadamente 10 mm de parede.

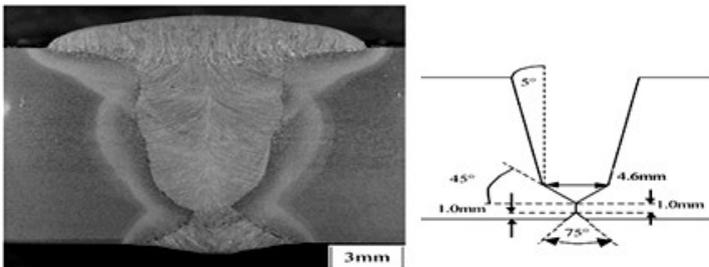


Figura 2-23 – Solda realizada em único passe com duas tochas e com dois eletrodos em cada uma, MIG/MAG Tandem, em tubo API X100.

A melhoria da produtividade passa pela mecanização dos procedimentos de soldagem, seguido da parametrização das variáveis e do

⁶ Cranfield Pipewelding Automated System

controle processual, em conjunto com a adequação do ambiente focado em resultados e ajustes no projeto da junta a soldar.

Alguns exemplos de chanfros são mostrados na sequência, aplicados à soldagem de raiz em tubulações.

A norma API 1104[25] diz respeito à qualificação de procedimentos para soldagem em tubulações empregada no segmento da indústria do gás e petróleo. Um exemplo de chanfro muito empregado em tubulações para o passe de raiz é mostrado na Figura 2-24.

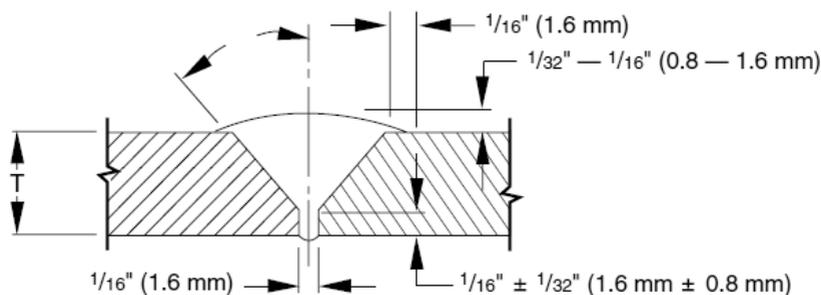


Figura 2-24 – Junta típica empregada na preparação de tubos, $\alpha=75^{\circ}$ [25].

A Figura 2-25 (a) e (b) apresenta os perfis geométricos da junta para a soldagem de tubos de parede espessa (acima de 22 mm), segundo a norma ASME B 31.3, para a soldagem com e sem a utilização de backing de cobre respectivamente.

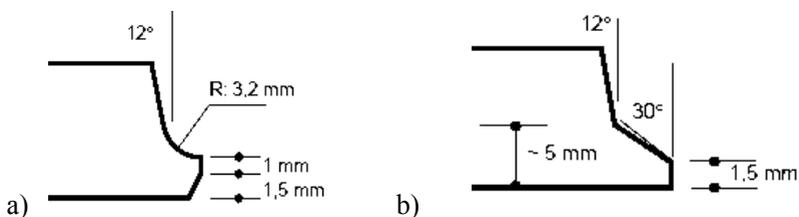


Figura 2-25- Perfis de chanfro para a soldagem de tubos de parede espessa, (a) com e (b) sem a utilização de backing de cobre.

3- MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta Seção são descritas as principais ferramentas tecnológicas a empregar e o caminho para atingir os objetivos desta dissertação.

3.1- CARACTERIZAÇÕES DO MATERIAL E DA JUNTA A SOLDAR.

A composição química do tubo e os ensaios de tração e de alongamento enquadram o material dos tubos como API 5L GRAU A ou ASTM 106 grau B (Tabela 3-1).

Tabela 3-1– Composição química e propriedades do material do tubo comparado à norma API 5L [25].

	%C máx.	%Mn máx.	%P máx.	%S máx.	Tubo Ensaiado		Norma API 5L GRAU A	
API 5L GRAU A	0,22	0,9	0,030	0,030			MPa	lb/pol ²
Tubo	0,20	0,8	0,028	0,028	MPa	lb/pol ²	(min)	(min)
	Limite de Resistência				462,5	67.070	48.000	
	Limite de Escoamento				311,4	45.150	206,0	30.000
	Alongamento mínimo (%)				38,6		28	

Neste estudo, o projeto da junta a ser soldada ficou definido com 2,0 mm de face da raiz (n) e 45° de ângulo de abertura do chanfro (α), diferenciando-se do caso geral (ASME IX) em que o passe de raiz tem para face da raiz $n=0$ [mm] e para ângulo de abertura do chanfro $\alpha=75^\circ$, Figura 3-1.

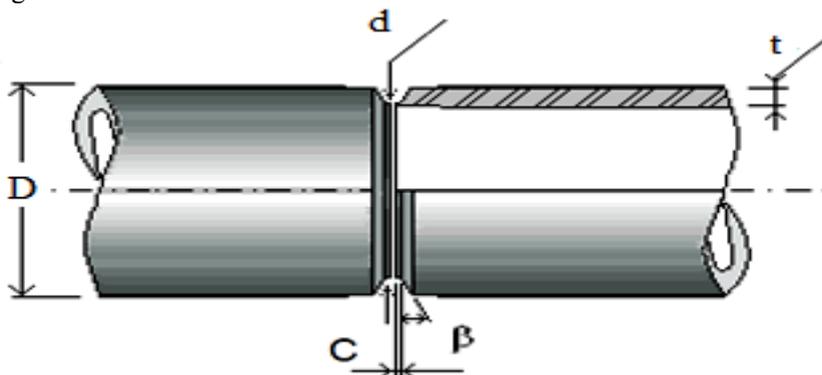


Figura 3-1– Desenho da junta a soldar

As dimensões do padrão para comparação Tubo Schedule 80: A=89, B=80,2 mm, C=2,0 mm, D=6,35 mm, $\beta=22,5^\circ$.

A Tabela 3-2 apresenta os elementos da Figura 3-1 para preparação da junta a soldar de acordo com a medida da face da raiz ($n=2$ e $n=4$ mm), desejada para cada caso específico de tubo.

Tabela 3-2 – Tubo Schedule (API 5L grau A ou ASTM A106 grau B)

Padrão	Schedule 40	Schedule 40	Schedule 80	Schedule 80
[mm]	NPS 3"	NPS 4"	NPS 3"	NPS 4"
D	88,9	114,3	88,9	114,3
d (n=2)	81,9	106,3	77,1	101,7
d (n=4)	85,9	110,3	81,1	105,7
t	5,49	6,02	7,9	8,3
C	2,0	2,0	2,0	2,0

Na Figura 3-2 são mostrados os elementos da junta chanfrada de interesse, para a dedução da área teórica remanescente a ser preenchida com solda, portanto as áreas que compõe o chanfro comercial são A1 e A2, e as áreas que compõe o chanfro especial, são A1, A2 e A3.

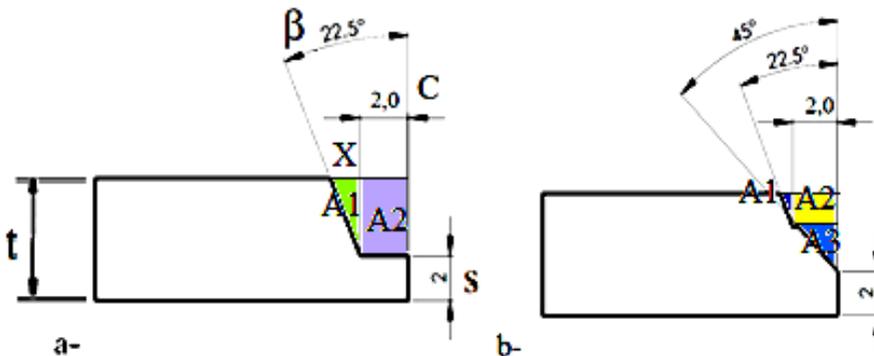


Figura 3-2– Elementos do chanfro.

Cita-se a seguir algumas características funcionais de desempenho de um chanfro.

Parade ou espessura (t): Inlui no dimensionamento do chanfro

Face da raiz (s): medida que equivale ao nariz da junta a qual deve permitir a penetração total com surgimento de raiz.

Ângulo e abertura total (α): função de permitir o acesso da tocha até a junta e pode influir no controle da poça, na estabilidade do arco e na eficiência térmica, lembrando que $\alpha = 2.\beta$.

Largura do rebaixo (C): pode acomodar ou não o raio anódico do arco e assim a medida “C” sugerida é de $2,0 \pm 0,2$ [mm] e para a soldagem de raiz TIG, se “C” for zero a junta volta a ser V.

Largura total da junta: pode limitar o acesso da fonte à junta [2.x.C].

Nos ensaios foram usados a medida “S” em 2 e 4 [mm].

No caso da soldagem de tubulações, considerando a pressão interna, deverá atender as normas específicas (ASME IX, API 1104) e testes mecânicos de tração, dobramento, dureza, macrografias, “Nick Break” e impacto podem ser requeridos por estas normas, para a qualificação de procedimento sendo muito empregado a norma EN 288. [25]

Ainda na Figura 3-2, visualizam-se as relações geométricas na dedução das equações para determinar as áreas removidas na preparação da junta a soldar.

Assim a área total removida na preparação da junta, pode ser determinada pela Equação 3-1

$$A_{tr} = 2.(A_1 + A_2 + A_3) \quad \text{Equação 3-1}$$

Havendo declarado que a área 1 (A_1), área A_2 e área A_3 e medida X, podem ter dedução matemática, Equações 3-2 a 3-5.

$$A_1 = x.[t-S]/2 \quad \text{Equação 3-2}$$

$$x = \tan \beta. (t-S); \quad \text{Equação 3-3}$$

$$A_2 = [C.(t-S)]; \quad \text{Equação 3-4}$$

Para chanfro de 2 mm, $A_3 = 0$ e para o chanfro especial, $A_3 = 2 \text{ mm}^2$

Se as equações acima são úteis para determinar volumes a serem preenchidos, as equações que seguem são úteis para medir a área da solda realizada. Considerando que a área total fundida (A_T) é um resultado da área fundida do metal de base (A_f) somada a área depositada (A_d) com arame, Equações 3-5.

$$A_T = A_f + A_d \quad \text{Equação 3-5}$$

A área A_d calculada é estimada pela Equação 3-6.

$$A_d = \pi r^2 \cdot \left(\frac{V_a}{V_S}\right) \quad \text{Equação 3-6}$$

3.2- DESENVOLVIMENTO E MELHORIAS NA BANCADA PARA SOLDAGEM DE TUBOS.

Inicialmente foi construída uma bancada eletromecânica, porém esta apresentou limitações, a exemplo, das dificuldades e dispêndio de tempo, para realizar o ajuste da VS requeria alterações de montagem na relação de transmissão. Nesta etapa um valor em volts era ajustado em uma fonte externa.

Para a melhoria da bancada produziu-se uma base para eliminar a transmissão, colocando o eixo do redutor alinhado com o eixo árvore da bancada. Introduzindo uma estrutura de tubos nas laterais da mesa foi possível realizar os primeiros cordões de solda utilizando uma tocha manual, sem refrigeração. Um sistema, conector elétrico, ressaltado em vermelho na Figura 3-3, foi desenvolvido para permitir a circulação da corrente no circuito de soldagem.

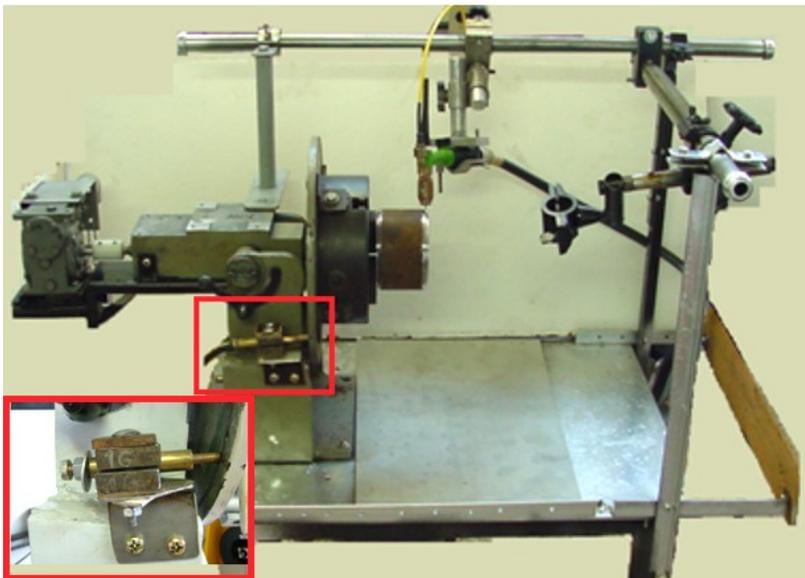


Figura 3-3 – Bancada eletromecânica.

A segunda versão da bancada com configuração analógica utilizou o motor DC, e a regulagem da VS era realizada através de um potenciômetro de resistência variável bastante discretizado (8 voltas para variar 24 V). O motor podia alterar a velocidade proporcionalmente a tensão em malha aberta. Porém exigia calibrações constantes na bancada para determinar a VS de forma confiável, além de não permitir a variação deste parâmetro, automaticamente, o que poderia ser de interesse a soldagem orbital. De qualquer forma estava satisfeita a faixa de velocidades entre 5 e 30 cm/min. e ensaios em tubos de 89 e de 114 mm de diâmetro externo, agora podiam ser executados.

Uma melhoria na motorização foi obtida pela instalação de um drive de controle de movimento, STEP/DIR⁷, e de um motor de passo com “encoder⁸” operando em malha fechada, cuja interface com o usuário passou a ser o programa “Mach3 CNC” em ambiente “Windows”, facilitando o ajuste da variável VS.

A configuração desejada para a bancada ter tecnologia em semelhança à flexibilidade de um cabeçote orbital, deve ter as possibilidades de soldagem de tubos estáticos e rotacionais, conforme a ilustração esquemática da Figura 3-4.

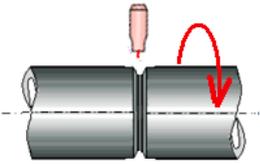
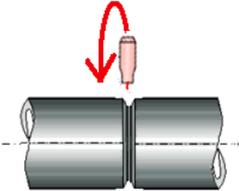
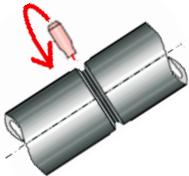
1G – O tubo gira com o eixo na horizontal e a tocha fica parada	5G - A tocha gira em torno do tubo com o eixo na horizontal	6G – A tocha gira em torno do tubo parado com o eixo a 45 ⁰
		

Figura 3-4 – Posições da soldagem de topo em tubulações.

Um sistema para fixação e centragem dos tubos por intermédio de um eixo mandril, com buchas cônicas em mancais de rolamento, foi empregado para fazer o eixo árvore rotacionar e os tubos manterem-se

⁷ Comando do motor de passo: aceleração e direção

⁸ Dispositivo eletromecânico que conta ou reproduz pulsos elétricos a partir do movimento rotacional de seu eixo.

estáticos com a tocha orbitando em torno do tubo ou o tubo girar com a tocha permanecendo estática.

Considerando que a soldagem de tubos exige um movimento cuja trajetória é curva, e devido as imperfeições do tubo, viabilizou-se neste trabalho uma bancada soldagem 1G com AVC (Figura 3-5).

Para suportar o regime da soldagem mecanizada, adaptou-se uma tocha refrigerada a um dispositivo suporte e de movimento com quatro graus de liberdade, permitindo mover longitudinalmente a tocha para a centragem no canal a ser soldado, um movimento de giro no eixo da tocha para conferir o perfeito alinhamento da tocha (ângulo de posicionamento) e também de deslocamento transversal ao eixo do tubo a ser soldado, promovendo o posicionamento conveniente da tocha de soldagem bem como o ajuste dinâmico do comprimento de arco mediante uso do AVC.

O AVC, primeiramente projetado para situações gerais de soldagem foi adaptado a bancada, porém mais leve, deve ser projetado para que o acionamento integre o conjunto de forma mais compacta devido a características emergentes da soldagem orbital, entretanto experimentos na posição 1G não requereu tal leveza do sistema mecânico do AVC.

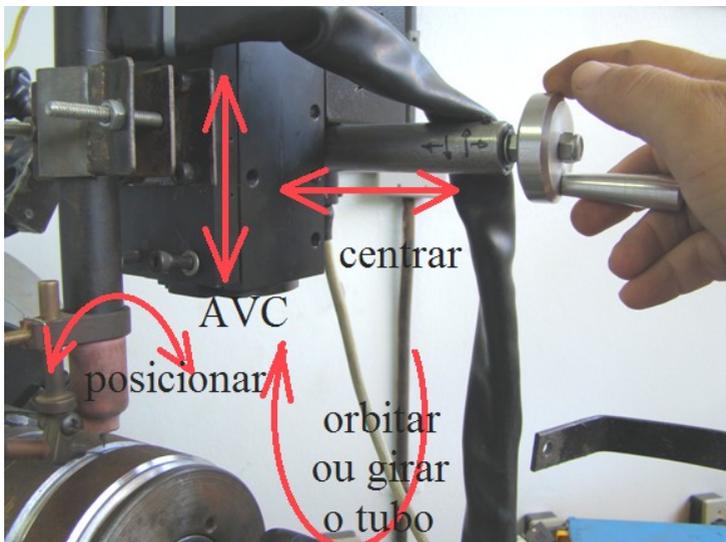


Figura 3-5 – Bancada CNC para soldagem 1G com AVC, com 2 graus de liberdade ajustados manualmente e 2 graus de liberdade mecanizados.

A bancada na forma orbital exigiu novas adaptações para empregar o AVC, e a solução é mostrada na Figura 3-6, que empregou um contra peso e o sistema mecânico do AVC foi para o referencial da placa aliviando o eixo centralizador da tocha no canal a soldar.

Os componentes constituintes da bancada orbital são:

1. AVC - acionamento
2. Placa auto centrante
3. Motor de passo (Redutor 1:50)
4. Pino de entrada do cabo obra
5. Base da bancada
6. Bucha ranhurada com parafuso de cabeça ergonômica
7. Parafuso de fixação do fuso longitudinal
8. Fuso de acionamento do eixo longitudinal
9. Bucha cônica
10. Tocha refrigerada e sistema unidade externa de resfriamento
11. Contra peso
12. Fonte eletrônica com sistema integrado de alimentação de arame

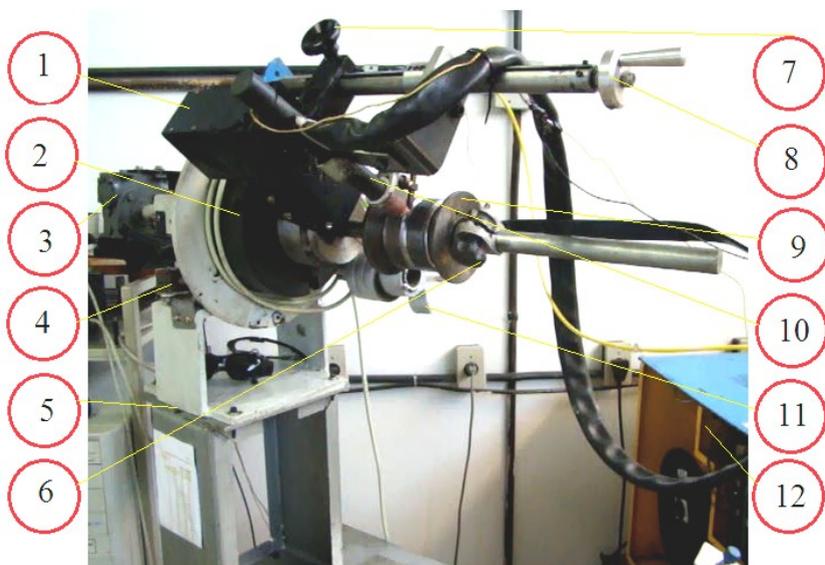


Figura 3-6– Bancada para soldagem de tubos estáticos e rotacionais em qualquer posição.

3.2.3 Sistema de controle da VS da bancada.

O sistema de controle da bancada consiste:

1. Driver;
2. Cabo paralelo;
3. Computador;
4. Software CNC Mach3.

O sistema de controle para obtenção da VS para a bancada é composto basicamente pelo *driver* STR8. Para o seu funcionamento foi desenvolvido uma fonte de alimentação para o conjunto driver e motor de passo, Figura 3-7.

O conjunto é composto pela chave geral (1), permitindo energizar o sistema, transformador (2) que rebaixa a tensão da rede de 220 V para 35 V (AC). Esta tensão é conectada na placa (3) que possui duas funções “freio e alimentação”.

A função alimentação da placa comporta um circuito composto por uma ponte retificadora que transforma a corrente alternada em corrente contínua constante, havendo capacitores atuando na filtragem de ruídos oriundos da alimentação (oscilações da rede, impedância dos cabos, campos magnéticos). A saída do circuito da placa resulta numa tensão de 70 volts, que é conectada por meio dos cabos vermelho e preto a alimentação do driver STR8(5). Ainda em (5) saem os 4 cabos de ligação para as bobinas do motor de passo.

Outro circuito da placa (3) é o de freio, cuja função é de curto-circuitar as bobinas do motor de passo quando o sistema se encontra desligado, assim o motor fica travado mesmo sem alimentação e evitando o escorregamento do motor quando desligado.

O sinal que sai pela porta paralela do computador através do cabo (7) é controlado pelo software CNC Mach3, sendo processado pelo *driver* STR8 e encaminhado por meio dos cabos chaveando as bobinas do motor de passo (6), que impõe a força magnética que fará movimentar com velocidade programada baseada em passo e direção (STEP/DIR) e frequência o eixo motor.

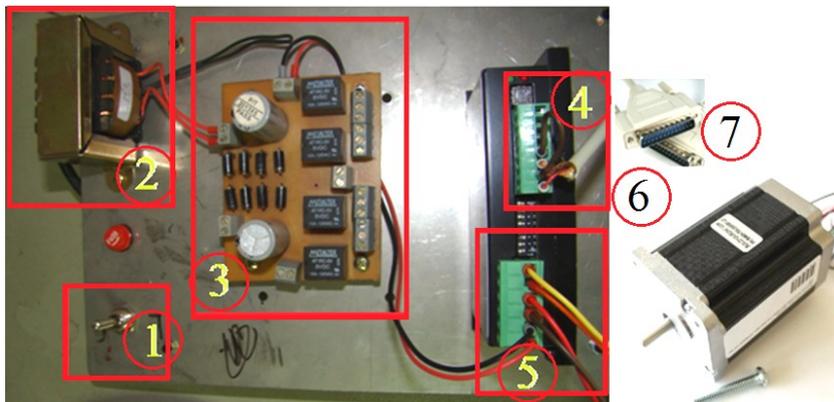


Figura 3-7 – Sistema de controle e motor.

Quando queremos realizar uma soldagem com a variação da VS ao longo da trajetória ao redor do tubo, pode-se utilizar o bloco de notas para escrever as rotinas e sub-rotinas.

3.3- DESENVOLVIMENTO DE BOCAIS DE TOCHA COM GUIA

Foram desenvolvidos três modelos de bocais de tocha (Figura 3-8), com o arame passando por dentro do bocal, seguindo a proposta de minimização de tempo e custos, características da fase de desenvolvimento de projeto.

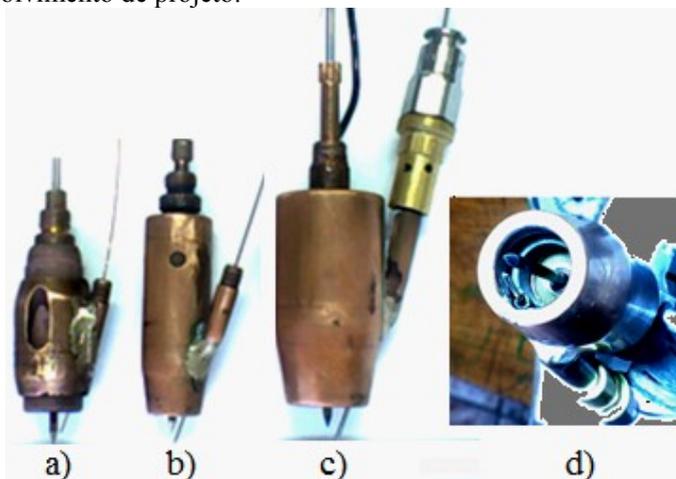


Figura 3-8 – Bocais TIG adaptados à alimentação radial de arame.

O bocal (a) foi adaptado para a alimentação de arame pretendida neste trabalho, perfurando-se a cerâmica, inicialmente, com o rebolo diamantado, comumente empregado na afiação de eletrodos de tungstênio. O bocal (b) é de fato uma adaptação de um bocal MIG. O bocal (c e d) enclausura o bocal cerâmico nº 8, com uma lente de gás.

3.4- VARIANTES DO PROCESSO TIG ARAME FRIO.

Na técnica do arame frio, o mesmo é alimentado no arco ou borda da poça de fusão a temperatura ambiente, sendo esta variante comumente utilizada. Quanto ao ângulo de alimentação do arame, classificamos como tangencial ou radial em relação ao eixo do eletrodo não consumível de tungstênio Figura 3-9. Estas duas possibilidades de introdução se revelam distintas. O arame quando alimentado tangencialmente poderá passar em uma região mais quente da coluna de plasma gerada no arco elétrico [19].

Para que isto aconteça o arame deverá passar tão próximo a superfície lateral do cone formado pelo apontamento do eletrodo, o que favorece a posição de alimentação do arame por trás do arco, porque pela frente do arco o arame fica susceptível a flexionar e a tocar no eletrodo, podendo desestabilizar ou interromper o processo.

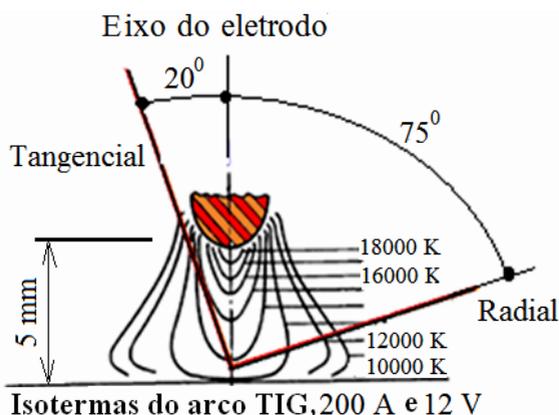


Figura 3-9 – Adaptada de LANCASTER apud MODENESI (2009)[8].

Ainda a soldagem empurrando, com o arame posicionado por trás, deverá favorecer a penetração, devido o arco de soldagem agir diretamente no material de base, pois o arame não se posiciona entre a poça e o arco (hipótese). Porém pode não ser uma boa configuração se o arame for

alimentado radialmente, pois que o eletrodo pode tocar o arame, caso este flexionar (hipótese).

Na Figura 3-10 o desenho representa o arame sendo alimentado radialmente pela frente do arco, e o ângulo “ Θ ” formado entre o eixo do eletrodo e a direção de soldagem ou eixo de soldagem. Se o ângulo “ Θ ” formado entre o eletrodo e a direção de soldagem na linha de solda for agudo ou menor do que 90 graus a soldagem é puxando, se maior que 90 graus dizemos empurrando.

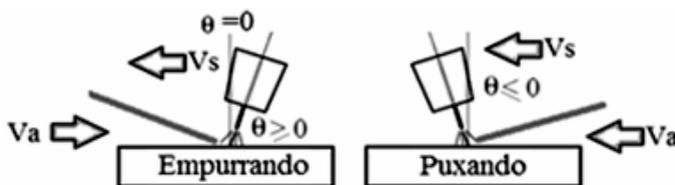


Figura 3-10 – Sentido de $V_a=V_s$ (por trás) e sentido de $V_a \neq V_s$ (pela frente).

Na Figura 3-11, verifica-se algumas possibilidades com relação a progressão da solda, ângulo de alimentação de arame e posição de alimentação, logo seria razoável testar estas técnicas na soldagem de tubos.

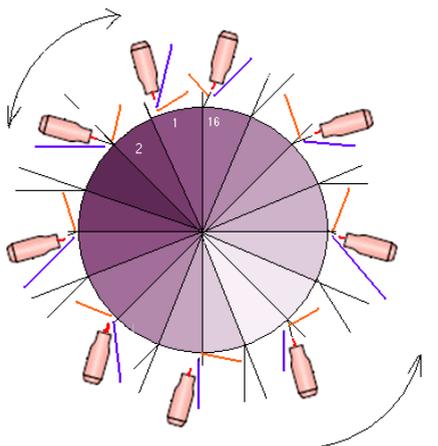


Figura 3-11 – Possibilidades de posicionamento de alimentação de arame; ângulo de alimentação de arame; progressão da solda e parametrização setorial.

O método de alimentação convencional, o qual introduz o arame de forma mais radial ao eixo do eletrodo, é empregado principalmente no

modo empurrando com o arame sendo posicionado pela frente do arco, e é muito usado em cabeçotes orbitais para soldagem de tubos e dutos [27].

A ponte estabelecida pelo crescimento da poça de fusão e a ponta do arame possibilita uma forma de deposição, que caracteriza o estado de maior taxa de deposição para este modo de alimentação. Este fenômeno favorece a sustentação da poça, ao escorrimento na soldagem fora de posição, e evita à falta de reforço na raiz como se verifica na soldagem autógena vertical descendente, devido a convecção da poça.

Quando se solda posicionando o arame por trás do arco, estando o arame tangente à poça poderá riscar o reforço na face da solda ou irá emaranhar-se, devido ao bloqueio de seu movimento, podendo atingir o eletrodo e interromper o processo. Já o método de alimentação radial com elevada velocidade tenderá a atravessar a poça e a raiz da solda.

Então diante de tais fatos um experimento fatorial completo na investigação comparativa destes diferentes métodos de alimentação de arame no arco TIG, pode ser realizado neste trabalho, onde NC representa o número de combinações ou de experimentos a realizar.

A Equação 3-1, de domínio universal, indica que o nível (N) dos fatores elevado a potência do número de fatores de controle (F) resultará, em um arranjo ortogonal, com um número de combinações ou de interações (NC) entre os fatores de controle (FC), dito fatorial completo.

$$NC = N^F \quad \text{Equação 3-7}$$

O planejamento fatorial (DOE) é uma das ferramentas de grande aplicação na experimentação industrial para a melhoria da produtividade processual. A simples análise do desvio padrão de uma amostra nos informa sobre o afastamento dos resultados em relação a média, porém geralmente outras análises são feitas, como o intervalo em que os dados oscilam em relação a média e a intensidade com que os fatores processuais inferem nos resultados coletados.

3.5- SOFTWARE IMAGE TOOLS

Com a execução das soldas, a análise deve ser realizada em termos do controle da geometria e inspeção visual fundamentada em medições. Do ponto de vista processual uma macrografia pode revelar muito sobre a integridade da junta soldada. Na Figura 3-12 o desenho dos elementos de interesse em medir na junta a ser soldada como a largura da raiz (L_r), a largura da face (L_f), reforço na face (R_f), altura do reforço na raiz (h_r), altura do cordão (h_c) e a penetração (p).

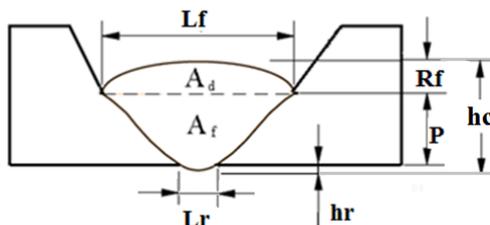


Figura 3-12 – Elementos de um cordão de raiz.

A taxa de deposição resultante do processo revelará na peça a área de metal de adicionado a junta então o software será empregado para a medição de macrografias. Note que a medida da face da raiz (nariz) possui a mesma medida da penetração na figura.

3.6- PARÂMETROS SETORIAIS DE PROCEDIMENTO USUAL INDUSTRIAL EMPREGADO NA SOLDAGEM DE TUBOS ESTÁTICOS.

Fabricantes de equipamentos devem certificar-se do correto emprego de uma tecnologia. Desta forma, parâmetros pré-estabelecidos e disponibilizados na IHM⁹, garantem o manuseio adequado quanto sua aplicação. Neste sentido, muitos ensaios devem ser realizados para que a tecnologia embarcada na venda de um produto seja eficiente. Portanto adota-se, neste trabalho, o emprego de um conjunto de parâmetros comercial, obtidos através de um ensaio de soldagem de um tubo Schedule 80 de 3” de diâmetro interno, exposto na Tabela 3-3.

Tabela 3-3 – Os parâmetros do passe de raiz (Polysoude).

Graus	Im (A)	Ip (A)	Ib (A)	tp (ms)	tb (ms)	U (V)	Va (m/min.)
Sector 1, (0° a 3°)	104	170	80	110	300	9,6	0,4
Sector 2, (3° a 100°)	115	170	95	110	300	9,3	1,0
Sector 3, (100° a 300°)	104	166	82	110	300	9,1	1,0
Sector 4, (300° a 358°)	104	166	82	110	300	9,5	1,0
Sector 5, (358° a 365°)	103	166	80	110	300	9,8	0,6

⁹ Interface Homem Máquina

A frequência de soldagem para todas as posições ou setores foi mantida em 2,4 Hz. A velocidade média foi de 5 cm/min.

3.7- A INCERTEZA DE MEDIÇÃO EM PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM.

Ao se especificar um sistema de medição é importante conhecer as incertezas associadas ao mensurando, bem como as fontes de incertezas do sistema de medição a ser utilizado.

Em soldagem, determinar a incerteza do processo é muito difícil devido ao grande número de fatores que atuam no resultado da solda. Mesmo que se determine a incerteza de um processo de soldagem, esta só será válida para as condições de contorno reveladas no ambiente de medição [28]. Quanto a medição das grandezas de soldagem deve-se considerar três aspectos: A faixa de operação do processo, a incerteza de medição e a resolução que se deseja no resultado da medição.

3.8- SISTEMA DE AQUISIÇÃO PORTÁTIL

O Sistema de Aquisição Portátil (SAP) foi utilizado na coleta dos sinais de tensão, corrente e V_a nos ensaios realizados. O SAP é um sistema é constituído de uma placa de aquisição de dados que teve sua origem na plataforma do TC-1, medindo correntes e tensão média e eficaz (RMS). Possui baterias, transdutor de velocidade de arame do tipo encoder com disco de 500 ranhuras, capaz de coletar até 5.000 pps, sensor magnético para medição de corrente elétrica por efeito Hall, cabos para medição de tensão e um computador portátil e software OSCILOS em ambiente Windows na IHM, que permite armazenar e acessar os dados coletados.

Algumas características técnicas do Sistema de Aquisição Portátil (SAP) são mostradas na Tabela 3-4.

Tabela 3-4 – Faixas de medição do SAP

Variável	Faixa	Resolução	Erro Al.
Corrente	- 600 a 600 A	0,8 A	2%
Tensão	- 100 a 100 V	0,1 V	1%
Vel. Arame	0 a 25 m/min.	0,1 m/min.	2%
Frequência de aquisição	5000	Hz	0,1%

4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo é mostrada a sequência dos ensaios que correspondem às técnicas de soldagem desenvolvidas ou reproduzidas com o TIG alimentado, aplicado ao estudo da soldagem de raiz, bem como a discussão dos resultados obtidos.

4.1- MOTIVAÇÃO E ORDENAÇÃO DOS ENSAIOS

Uma avaliação primeira consistiu em verificar a reprodutibilidade de um parâmetro conhecido, assim os insumos básicos foram reunidos e procurou-se praticar a solda obtendo a máxima penetração. Constantemente, questionou-se o incremento em produtividade através do aumento na VS e do enchimento da junta no passe de raiz. Para atingir estes propósitos empregou-se a mistura de gás argônio com 5% de hidrogênio e a corrente pulsada e estudou-se o comportamento da penetração e do surgimento da raiz, realizando medições na solda e relacionando com os parâmetros regulados no processo.

Para calibrar os equipamentos e instrumentos e verificar os procedimentos, os resultados foram comparados com um parâmetro de referência.

4.2- ENSAIOS DE SOLDAGEM EM TUBOS

Os ensaios foram realizados em acordo com a perspectiva apresentada na Seção 4.1, e para verificar o surgimento da raiz da solda em tubos Schedule 40 e 80 de 3 e 4 polegadas de diâmetro, foi empregado inicialmente o gás argônio puro para verificar a calibração do equipamento e a adequação dos procedimentos, comparando-se os resultados com um parâmetro comercial.

Após se realizou experimentos para verificar a raiz da solda em diferentes preparações de chanfros, tipo de gás de proteção, VS, posição de soldagem, posição do arame no arco, Va, frequência de pulsação e intensidade da corrente de soldagem.

4.2.1- Reprodução do parâmetro de referência adotado ou comercial, posição 1G com gás argônio puro.

O problema consistiu-se em reproduzir a solda da Figura 4-1 com parâmetros de acordo com a Tabela 3-3, setor 2, para a posição 1G. A

junta foi montada no mandril do eixo árvore da bancada, e a tocha permaneceu parada (aprox.12 h) com alimentação radial de arame pela frente do arco.



Figura 4-1 – Situação de soldagem 1G com alimentação radial.

O resultado obtido na solda realizada e mostrada a Figura 4-2 foi satisfatório, pois a raiz apresentou regularidade em toda a sua extensão com um fator de forma 0,6 (adimensional), com a largura da raiz um pouco mais robusta do que a raiz do parâmetro comercial.

Outro fator relevante foi que a pequena convexidade na face da solda não revelou ausência de raiz, e este perfil em cunha obtido a baixa VS, configura uma poça de dimensões reduzidas, portanto desejada a soldagem fora de posição, como a orbital realizada com o parâmetro comercial.



Face da solda



Raiz



Raiz parâmetro comercial

Figura 4-2 – Imagens da face da solda e da raiz da solda, para $U=9,6$ V.

4.2.2- Influência do comprimento de arco na soldagem de raiz com argônio puro e face da raiz em 2,0 mm.

Diante do interesse em realizar estudos com a mistura gasosa $Ar+5\%H_2$ – a qual não admite uma tensão de 9,3 V devido às características estáticas do arco TIG nesta situação – verificou-se que o

comprimento de arco equivalente à mistura de gás com hidrogênio resultou em uma tensão de 12 V.

Prosseguindo com os ensaios empregando o gás argônio puro, mostrados na Figura 4-3, porém com elevação da tensão, de 9,3 para 12 [V], obtido com o aumento do comprimento de arco, se verificou que a face da solda apresentou-se ligeiramente côncava, e a largura da raiz da solda, mais larga do que em relação à solda realizada com a tensão do arco em 9,3 V. Aponta-se ainda que a face da solda apresentou-se em um perfil ligeiramente côncavo e a raiz da solda foi robusta, porém mais estreita que na face. A largura da raiz obtida com a tensão de arco em 12 V é mais larga se comparada com a largura da raiz obtida com 9,3 V.

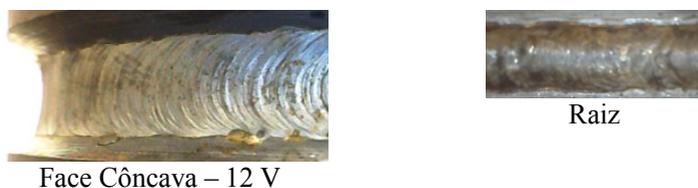


Figura 4-3 – Imagens da face e da raiz da solda com gás argônio puro.

Mais experimentos foram realizados nesta condição, e verificou-se com o AVC mantendo a tensão média em 12 V – que o comprimento de arco ficou em torno de 4 mm. Devido ao ângulo de abertura total do chanfro ser pequeno, 45° , em alguns ensaios ocorreu desvio lateral do arco, caracterizando o sopro magnético descrito na Seção (2.1.3). Ao ocorrer o sopro magnético, a configuração do arco ficou prejudicada e devido ao seu desvio, fundiu as margens da junta, evidenciando uma deposição de arame assimétrica em relação à linha de solda, o que faz alterar o resultado da raiz não surgida.

Este problema foi contornado aumentando-se a largura do canal através do aumento da largura do rebaixo (medida C da Figura 3-3) do chanfro original de 1,7 mm para 2,2 mm, porque o canal estreito torna mais suscetível o desvio do arco. Outro motivo foi devido à precisão da bancada com relação à qualidade dos alinhamentos e folgas, quando praticada a soldagem orbital, em que a largura do canal da junta é altamente relevante, para permitir pequenas variações (ordem de 0,2 mm) na centragem do eletrodo em relação a linha de solda. Outra medida adotada para eliminar o efeito do sopro magnético foi a de oferecer outro caminho para a circulação da corrente e um sistema de contato dinâmico do cabo obra (positivo), através de um pino de cobre estático

que mantinha a pressão por meio de uma mola sobre o flange girante para passagem da corrente que foi desenvolvido para a bancada, destacado na Figura 3-4.

4.2.3- Verificação da raiz da solda com argônio puro (n = 2,2 mm).

Para o emprego do gás argônio puro, elevou-se a face da raiz de 2,0 mm para 2,2 mm, mantendo os parâmetros da posição 1G conforme a Tabela 3-3, Setor 2, e foi suficiente para não verificar-se o surgimento da raiz.

As macrografias das soldas de raiz são mostradas na Figura 4-4, para 9,3 V de tensão e a direita para 12 V, porém a ponte estabelecida entre a ponta do arame com a poça de fusão foi rompida devido ao maior comprimento de arco e a transferência de metal, estas em gotas que se depositaram com certa assimetria em uma das amostras, de tal forma que a perturbação no arco foi mínima. Ainda a figura mostra que a raiz da solda foi escassa ou inexistente (para 9,3 V de tensão) e boa (para a tensão de 12 V). Na elevação da face da raiz para 2,5 mm, não houve mais raiz.



Figura 4-4 – Macrografias: esq. tensão de arco 9,3 V; dir. 12 V.

Constatou-se também que em virtude da elevação da tensão devido a maior distância eletrodo peça (DEP), um ganho de potência no arco e devido a esse fez despontar a raiz na junta. O oscilograma do cordão com a tensão de arco com 12 V com surgimento da raiz pôde ser verificado na Figura 4-5.

Quando a tensão média empregada foi de 12 V, a variação desta ficou na faixa entre 10 V e 14 V, havendo necessidade de filtragem do sinal para que o dispositivo de controle do arco não fosse sensibilizado quando se empregasse a corrente pulsada, no sentido de evitar o recuo do arco no momento da subida da corrente, fator que refletiria na potência média regulada no processo. Isto implica que o equipamento de controle de arco, deve ter funções especiais para operar com o TIG alimentado com corrente contínua pulsada.

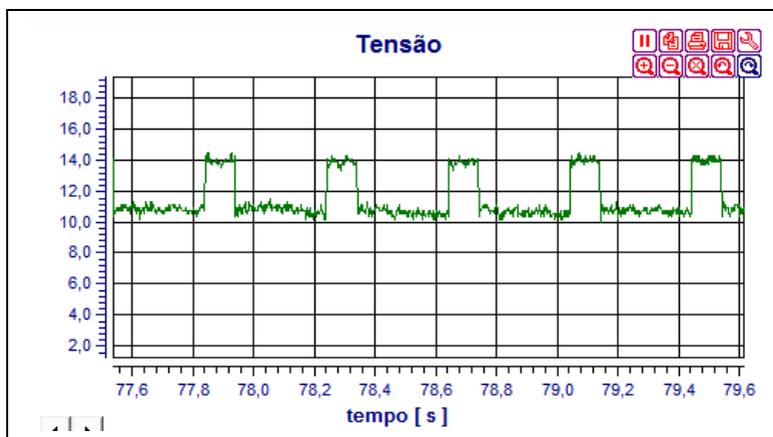


Figura 4-5 – Oscilograma de tensão quando se utiliza o AVC ajustado para a tensão média de 12 V e corrente pulsada média de 113 A.

Para tornar viável à soldagem com alimentação de arame empregando-se a corrente pulsada na soldagem a arco TIG, realizou-se a regulagem da variável K_p (constante de proporcionalidade), que tem por finalidade alterar a velocidade que o AVC corrige a altura do arco.

Foram empregados os valores: $K_p=3$ e $Z_m=0,3$ V nas soldas realizadas (Figura 4-6). Observe que a zona morta em 0,3 V permite que o sistema dinâmico do AVC não atue para a variação inferior a esse valor em volts em relação ao valor ajustado de 12 V.



Figura 4-6 – Parâmetros ajustados no AVC.

4.2.4- Apuração da raiz da solda, com gás $Ar+5\%H_2$ quando se atuar na VS.

Para facilitar a sequência de ensaios com a mistura de gás de maior eficiência de fusão, procederam-se ensaios na posição mais elementar, ou seja, a plana.

Para estes ensaios foram utilizados os parâmetros descritos na Tabela 3-3, setor 2, com o nariz da junta originalmente em 2,0 mm e a mistura gasosa com hidrogênio.

Das séries de experimentos com a mistura de gás mais produtiva, a primeira constituiu-se em realizar soldas de raiz em tubos com o mesmo perfil de chanfro do parâmetro de referência. Figura 4-7.

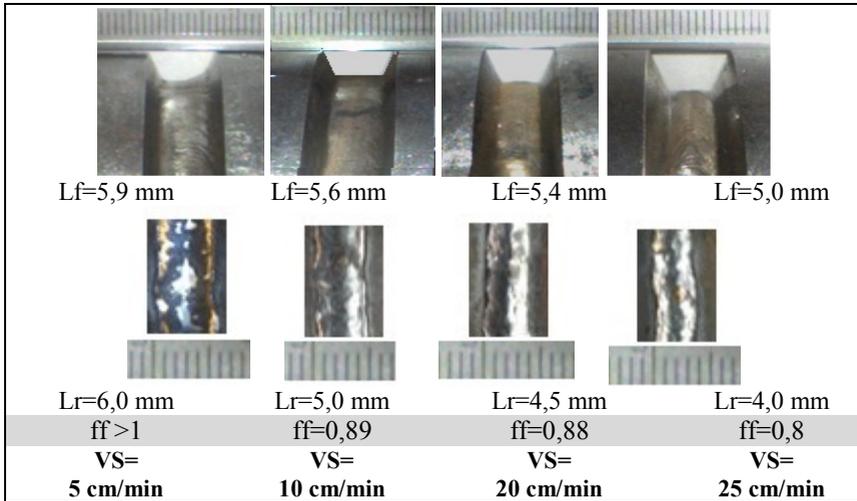


Figura 4-7– Soldas variando a VS em tubos *Schedule 80* de 3”, gás Ar+5% H_2 .

Nesta fase chegou-se a 35 cm/min. de VS com raiz de solda satisfatória e sem defeito aparente, porém a raiz cada vez foi estreitando mais, e com VS=40 cm/min. não ocorreu mais a penetração total.

4.2.5- Verificação da raiz da solda, parâmetro comercial, para n=2,5 mm.

Com o objetivo de comparar a geometria do cordão de raiz em relação aos parâmetros qualificados com o gás argônio puro, foram utilizados os parâmetros descritos na Tabela 3-3, setor 2. Entretanto o nariz da junta de 2,0 mm passou para 2,5 mm, reduzindo custos de preparação e tempo de execução.

Mediante a troca do gás, manteve-se a mesma corrente, porém a tensão de soldagem alterou a potência do arco e a VS foi progressivamente aumentada, com a finalidade de observar o comportamento da raiz da solda.

O primeiro ensaio do cordão de raiz, apresentou um fator de forma, Equação 2-1, que tendeu inicialmente a valores acima de 1, que é característico quando o aporte de calor na raiz da junta é alto, e pode resultar em um reforço excessivo na raiz da solda, Figura 4-8.

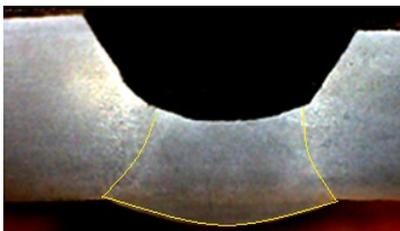


Figura 4-8 – Passe com elevada energia na raiz da solda, nariz 2,5 mm.

Na Figura 4-8, observa-se a depressão central na face da raiz (côncava) resultado da ação do arco que acentua a convecção da poça. Uma característica quando se emprega o gás com hidrogênio em soldas é a variação do potencial de energia do hidrogênio molecular para atômico ao passar pelo arco, e a liberação de energia na poça para voltar à forma mais estável (diatônica), fenômenos que podem contribuir, segundo o princípio de conservação da energia, com aumento da região fundida na solda.

Também se verificou pelo formato trapezoidal, apresentado pela geometria da zona fundida, visto na macrografia, que o calor passa a distribuir-se lateralmente, na medida em que a raiz avança para o perfil retangular, ao invés de um formato em cunha. Tal fenômeno é de grande importância ao estudo da soldagem de raiz porque há pontos do processo em que a região fundida deixa de ocorrer no sentido da penetração e passa a ocorrer no sentido do incremento da largura.

Neste trabalho observou-se que a raiz estreita é mais facilmente obtida com o gás argônio puro e raízes largas com a mistura comercial de argônio com 5 % de hidrogênio, na soldagem de aços carbono.

4.2.6- Verificação do efeito da VS sobre a área fundida.

Com o objetivo de comparar a geometria do cordão de raiz em relação aos parâmetros qualificado com o gás argônio puro, foram realizados ensaios com a mistura de gás argônio com 5% de hidrogênio, na posição mais elementar 1G. Foram utilizados para estes ensaios os mesmos parâmetros descritos na Tabela 3-3, setor 2, Schedule 80 de 3", porém o nariz da junta originalmente em 2,0 mm passou para 2,5 mm.

Na Figura 4-9 é possível verificar que na medida em que a VS cresce, aproximadamente linearmente, a área total (A_t) que compreende a área fundida no metal de base (A_f) somada à área de metal depositada (A_d), decresce no intervalo compreendido entre 5,0 cm/min. e 10 cm/min., crescendo sensivelmente no intervalo compreendido entre 10 cm/min. e 12,7 cm/min., após volta a decrescer.

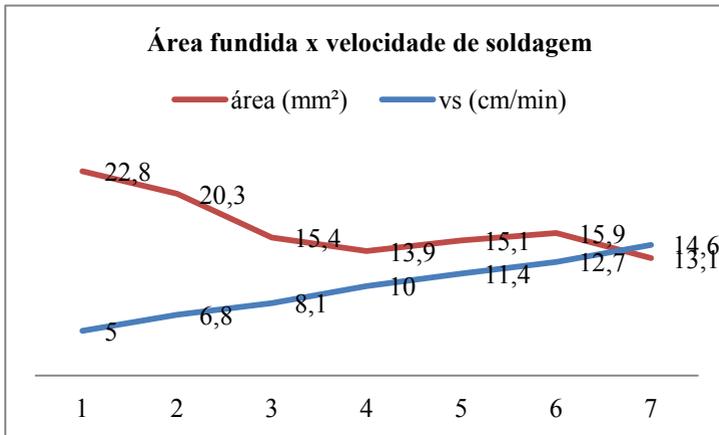


Figura 4-9 – Comportamento da área com variação na VS.

Na média, a área total, decresce aproximadamente linearmente com o crescimento da VS. Os cordões 1 e 2 apresentaram raiz excessiva, e o cordão 3 com boa raiz, 4 com raiz com pouco reforço, 5 com a raiz segmentada e os cordões 6 e 7 com falta de penetração, determinando desta forma parâmetros para soldagem de raiz. Para 8,1 cm/min. reproduziu uma raiz com certo incremento em produtividade, por minimizar o tempo.

4.2.7- Influência da DEP na soldagem de raiz e a forma de deposição do arame.

Certificou-se que a distância eletrodo peça é fator de grande importância no estabelecimento da forma de deposição do arame. Isto ocorre porque o arame (sólido) encontra-se no referencial da tocha, de tal forma que se houver durante a soldagem, o aumento da distância eletrodo peça, o arame pode perder o contato físico com a poça (fluida), podendo alterar o regime de deposição e o modo como ocorre a transferência do metal de adição no processo.

A transferência por uma ponte ocorre quando o arame toca a poça e em gotas (goticular) quando o arame funde dentro do arco.

Quando a deposição é goticular, ocorre a perda dos benefícios da tensão superficial, que é uma propriedade do metal no estado líquido de se unir através de uma força de ligação, e esta energia de ligação é desejada a soldagem sobre cabeça, por entregar o metal de adição à poça de maneira a minimizar a possibilidade de escoamento, tornando o procedimento menos instável.

Então com a elevação do valor de referência para a grandeza tensão elétrica do arco de soldagem, observamos o maior distanciamento entre o arco e a poça, momento em que a energia do arco distribui-se por uma região maior, dita anódica, sendo esta a característica marcante do efeito da tensão relacionada ao alargamento do cordão na face da solda, podendo haver aumento ou a diminuição da penetração [8].

4.2.8- Verificação da raiz, para a face da raiz em 4,4 mm, obtida com o aumento da tensão, empregando Ar +5%H₂.

Uma das possibilidades de customizar um procedimento consiste em realizar a soldagem em um único passe. Uma tentativa aplicada neste sentido foi realizada atuando-se na tensão, e manteve-se os demais parâmetros da Tabela 3-3, setor 2, tubo Schedule 40 de 4”.

A face da raiz da solda foi elevada para 4,4 mm, Figura 4-10. Durante o passe de raiz, houve o nivelamento quase completo da junta.

Na soldagem em único passe com a tensão ajustada em 14 V, verificou-se o surgimento da raiz da solda, o que não ocorreu com 12 V,

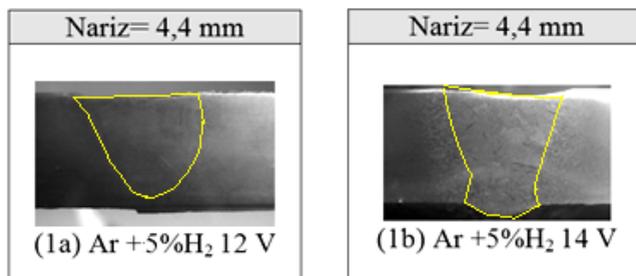


Figura 4-10– Macrografias de soldas obtidas com 12 e 14 V.

O procedimento apresentou economia no arame e na preparação do chanfro, porém a solda não apresentou a repetitividade desejada. Destaque para a geometria do cordão com 14 V, que apesar de avançar em forma de cunha, ocorreu o alargamento da raiz antes desta despontar.

O parâmetro da Tabela 3-3, setor 2, para $n = 4$ mm, não apresentou repetitividade, mas serviu como base para estudo da penetração e geometria do cordão de solda. Estes ensaios mostraram que o melhor parâmetro em termos de produtividade não se revelou repetitivo, exigindo assim mais ensaios.

4.2.9- Soldagem de raiz em tubo *Schedule 40* de 4", com a face da raiz em 4 mm e a baixa repetitividade da raiz.

A Figura 4-11 mostra que a raiz é segmentada. Observa-se que com 200 A de corrente de pulso, a raiz não surgiu, e a energia realizou trabalho em fundir no sentido transversal a linha de solda, ou seja, a penetração foi menor com a corrente de pulso maior.

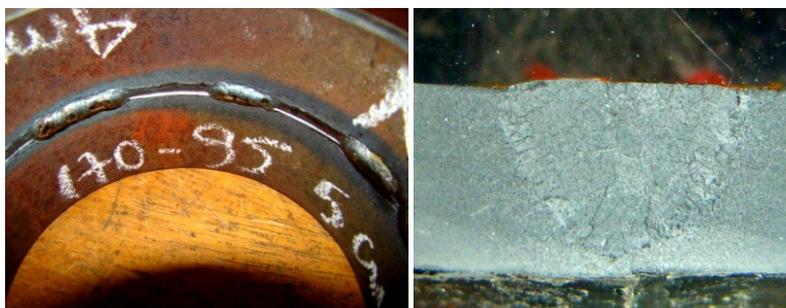


Figura 4-11 – Raiz intermitente e macrografia do segmento sem raiz.

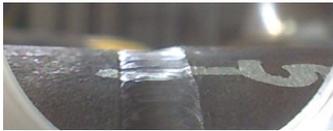
O perfil geométrico em forma de cunha, que poderia resultar em uma raiz de largura estreita, que de fato ocorreu, mas de forma segmentada, chamou atenção para realizar ensaios com parâmetros de valores próximos.

Na Figura 4-12, cordão 6, observa-se que a corrente de base foi aumentada em 15 A e mantida a corrente de pulso original em 170 A, houve o alargamento da raiz da solda, conferindo um maior aporte térmico, devido a elevação da energia média de soldagem. No cordão 5, elevou-se a corrente de pulso em 15 A e manteve-se a corrente de base original em 95 A, e o cordão apresentou uma área menor fundida, visto que a largura na raiz foi mais estreita do que na face quando utilizada uma corrente média de 117 A.

Apesar da diferença da corrente média entre os dois parâmetros ser de apenas 8 A, a diferença de potência média foi de 96 W, energia suficiente para alterar a configuração da região fundida. Nota-se ainda que

no cordão 6 , o qual possui uma similaridade geométrica com o cordão 5, e que também a poça desceu em um movimento convectivo e que o centro baixou mais do que as margens do cordão resultando em uma face côncava. Observa-se que ocorreu o alargamento da raiz no limiar de seu surgimento.

Cordão	Tubo	Parede	Nariz	Fresta	F(Hz)	Tensão	VS
5	Sch 4"	6,0mm	4,0	0 mm	2,5	12 V	5
Área		Vam	tp	tb	Ib	Ip	Im
38 mm ²		1,0 m/min	0,1 s	0,3 s	95 A	185 A	117,5





Cordão	Tubo	Parede	Nariz	Fresta	F(Hz)	Tensão	VS
6	Sch 4"	6,0mm	4,0	0 mm	2,5	12 V	5
Área		Vam	tp	tb	Ib	Ip	Im
44,2 mm ²		1,0 m/min	0,1 s	0,3 s	110 A	170 A	125





Figura 4-12 – Alterações nas correntes de base e de pulso e efeito no na geometria do cordão de raiz.

Com as dificuldades encontradas em repetir a raiz com a face da raiz em 4 mm, foi realizado uma série de ensaios, cujas tabelas podem ser verificadas no apêndice deste trabalho. Em síntese com a face da raiz em 4 mm procurou-se encontrar a raiz fixando parâmetros para energia de soldagem e alterando somente a VS. Os ensaios consistiram em realizar soldas para compreender a evolução da penetração até o surgimento da raiz da solda, então quatro velocidades de soldagem basicamente fizeram parte dos ensaios 5, 7,5, 10 e 15 (cm/min.).

Em contrapartida com a elevação da VS foi necessário aumentar a energia de soldagem para que a penetração fosse ao limite do surgimento da raiz da solda. Estes ensaios permitiram realizar uma serie de medições. Alguns dos resultados serão mostrados a seguir nas subseções 4.2.10 e 4.2.11.

4.2.10- Relações entre a VS e a altura do cordão.

Na Figura 4-13, verifica-se que para uma mesma energia de soldagem a altura do cordão (penetração e reforço) vai diminuindo quase que linearmente na medida em que a VS vai aumentando, exceto pelo ponto em que a raiz da solda surgiu com elevado reforço para VS em 7,5 cm/min. a qual teve largura da raiz mais estreita em relação a 5 cm/min.

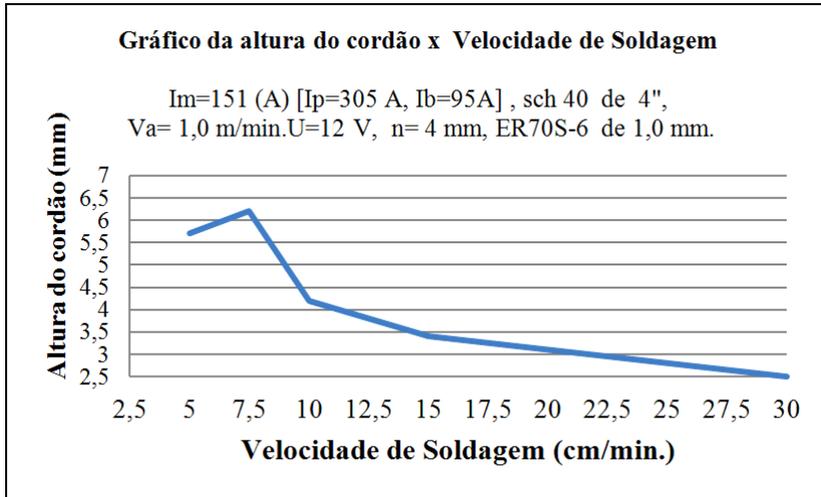


Figura 4-13 – Alterações na VS e o efeito geométrico na altura do cordão.

A altura do cordão compreende a altura do reforço na face e a altura do reforço na raiz mais a medida da face da raiz ou nariz da junta. Explicando melhor o pico do gráfico da Figura 4-13, observou-se que a penetração é total para VS (5 cm/min.), mas como houve raiz e há o reforço da solda, grande parte do metal adicionado a junta ficou no reforço, e devido à elevada energia na raiz da solda, ao invés de aumentar a altura do reforço na raiz houve o aumento da largura deste, conferindo desta forma uma menor altura do cordão. Com a velocidade de 7,5 cm/min., houve a diminuição da energia excessiva na raiz da solda fato que estreitou a largura da raiz, conferindo um reforço na raiz mais convexo e, portanto, deixando a altura do cordão mais elevada do que à 5 cm/min.. Quando se elevou VS para 10 cm/min., a altura o cordão permaneceu no limiar em torno de 4,2 mm, porém não conferiu a raiz na solda.

Na medida em que VS aumenta, a taxa de deposição diminui para Va constante, e a área de metal depositada sofre variação inversa com o aumento da VS, assim como a energia que chega até a raiz. Estes fatores têm influência no surgimento e geometria do cordão de raiz, como a diminuição do reforço e da largura da raiz da solda. A energia na raiz pode ser entendida como volume fundido que excede a superfície oposta da face da junta.

4.2.11- Análise da corrente de pulso e da corrente de base e o efeito na altura do cordão e na eficiência de fusão.

O comportamento da altura do cordão, com a corrente contínua pulsada média, revelado nas macrografias mostra que na medida em que a corrente aumenta, a altura do cordão aumenta em média quase que linearmente, havendo a relevância de que não ocorreu o surgimento da raiz. Porém, é verificado que há crescimentos e decrescimentos alternados na altura do cordão, quase que em intervalos simétricos do incremento de corrente, Figura 4-14.

Como já foi dito neste trabalho, uma consequência do uso de corrente pulsada é que durante a fase de pulso, devido à elevação da corrente ocorre o aumento da potência do arco com elevada intensidade. Esta energia é transferida para a poça de fusão havendo condução cuja direção dependerá da configuração da junta e do material.

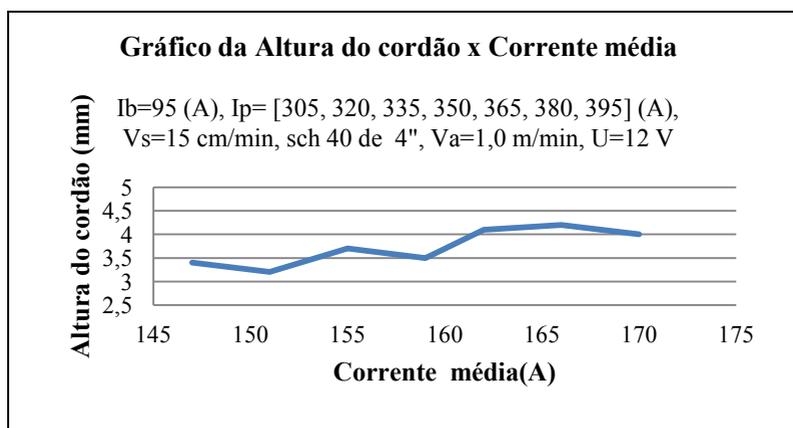


Figura 4-14 – Alterações na corrente contínua pulsada média de soldagem e efeito na altura do cordão, ao utilizar a mistura de gás Ar+5%H₂.

Supõe-se que um efeito isolante ocorra devido à camada de metal líquida interposta entre o arco e o metal que ainda não fundiu, de tal forma que durante a fase de maior energia do arco, fase de pulso, uma penetração maior e em forma de cunha pode ocorrer ou não. A morfologia do cordão que lembra o formato de cunha na zona fundida é desejada porque revela uma penetração mais incisiva do processo e uma poça de dimensão mais reduzida, em termos de volume, configurada uma janela de parâmetros processuais muito bem definidos. Observou-se que a penetração diminui quando a largura aumenta no fundo da poça, medidos após a soldagem através da macrografia. Havendo aumento da energia média, a penetração volta a crescer e a largura a diminuir. Isto se torna evidente que há alterações no caminho em que ocorre o escoamento da energia (condução), isto é, ora se dá na direção do eixo que propicia a penetração, outrora no eixo transversal a este, seja no sentido do alargamento medido no fundo da poça, ou na largura da raiz.

Na Figura 4-15, o gráfico ilustra que para distintos valores de corrente média, duas vezes ocorre à intersecção com o eixo (eficiência de fusão em 45%), o que se torna evidente que em média este valor manteve-se aproximadamente constante e dentro de uma faixa em torno de 39% a 51% de aproveitamento do potencial calorífico da fonte. Ainda deve ser considerado que a eficiência térmica adotada foi de 0,67, e a entalpia de fusão de $10,5 \text{ [J/mm}^3\text{]}$.

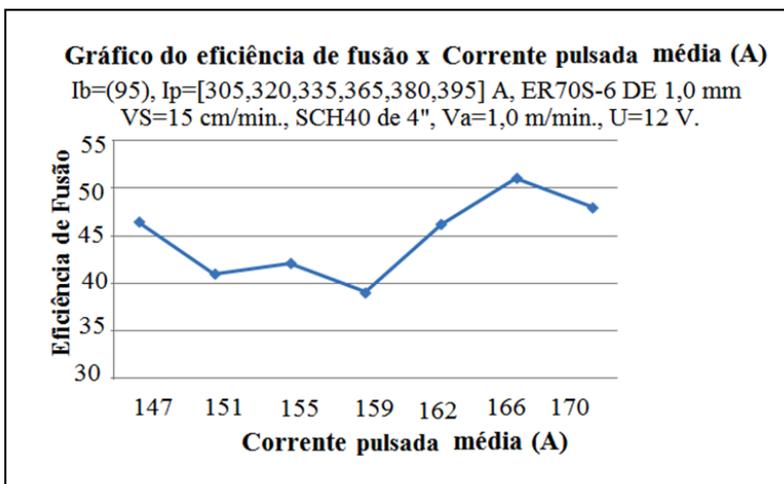


Figura 4-15– Comportamento da curva eficiência de fusão devida a alterações na corrente pulsada média, Ar+5% H_2 .

Na série das soldas de raiz realizadas, Figura 4-16, em que se manteve fixa o valor da corrente de pulso em 290 A e atuou-se na corrente de base de maneira incremental em 15 A. O gráfico mostra um comportamento praticamente linear da penetração em relação ao incremento sucessivo da corrente média, havendo a penetração com o surgimento da raiz da solda para os valores de corrente ajustados: $I_p=290$; $I_b=185$ A com $I_m=211$ A.

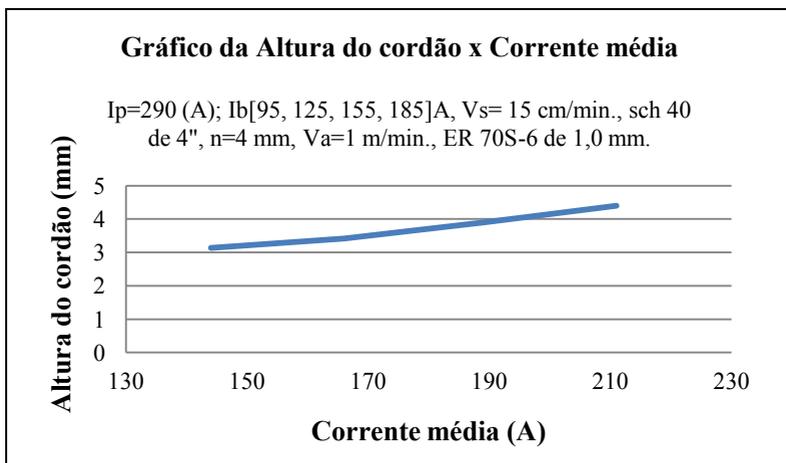


Figura 4-16 – Alterações na corrente contínua pulsada média de soldagem e efeito na altura do cordão de solda, ao utilizar a mistura de gás $Ar+5\%H_2$.

As macrografias dos cordões desta série são exibidas na Figura 4-17. Aponta-se que o perfil em cunha avança na direção da penetração, mas quando ocorre o surgimento da raiz o perfil assumido passa a ser o retangular.

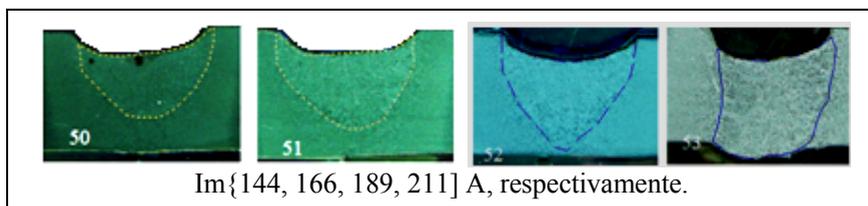


Figura 4-17 – Macrografias do efeito da corrente contínua pulsada média de soldagem na penetração da solda, ao utilizar mistura de gás $Ar+5\%H_2$.

Na Figura 4-18 o aumento progressivo da VS ocasiona a diminuição da quantidade de material depositada na junta denotada pela

área depositada (A_d), que diminui assintoticamente. Assintoticamente porque por mais que se eleve a VS a taxa de deposição sendo positiva jamais será zero e desta forma nunca interceptará o eixo “x”, apesar de podermos considerá-la nula para grandes valores de VS. Assim para manter-se um perfil geométrico constante de um cordão TIG alimentado, na medida em que se aumenta a VS deve-se também atuar no valor de V_a , o que resultaria atuar na taxa de deposição e na energia do arco caso o desejo for obter a mesma penetração. Embora seja lógico este raciocínio outras adversidades podem surgir dificultando os resultados desejados, como no passe de raiz, em que a deposição é a mínima necessária para que confira um pequeno reforço na raiz.

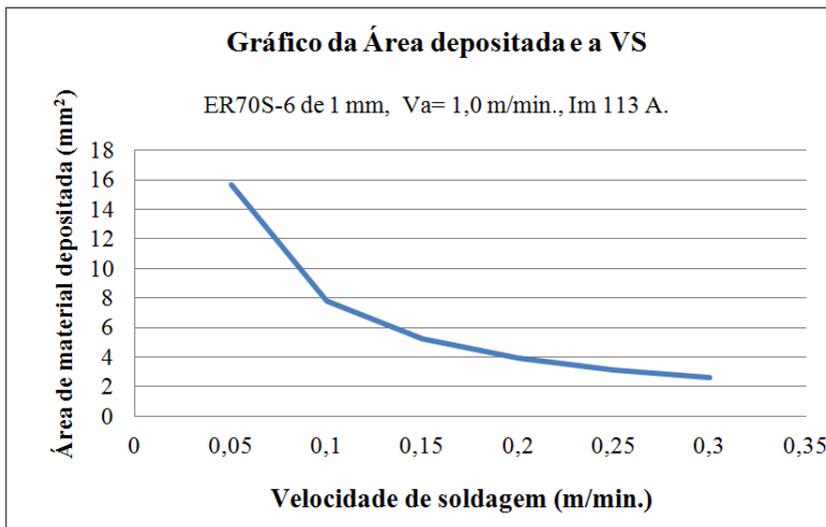


Figura 4-18 – Comportamento da evolução da área depositada com o aumento da VS, parâmetro 1G, ao utilizar a mistura de gás Ar+5%H₂.

4.2.12- O efeito da velocidade do arame no surgimento da raiz

De acordo com a Tabela 4-1 podemos fazer algumas considerações a respeito do surgimento da raiz da solda e da possível influência da V_a e taxa de deposição.

Verificou-se experimentalmente, em ensaios sem replicas que a raiz da solda surgiu quando foram aplicados os parâmetros descritos na Tabela 4-1, para o ensaio N=6.3. No ensaio que segue N=6.4, manteve-se a energia constante e aumentou-se a V_a no tempo de pulso (0,1 s) de 1,0

para 1,5 m/min. e ainda assim conferiu-se a raiz da solda. No seguinte ensaio, $N= 6.5$, a velocidade média de alimentação aumentou em relação ao parâmetro anterior, visto que o tempo de base foi de (0,3 s), e não houve mais o surgimento da raiz. Então a diferença na alimentação de arame menor do que 0,2 m/min. pode influenciar no surgimento da raiz, ou por outro mecanismo como a contração da poça que não permita mais que a energia calorífica do arco atinja a camada mais profunda da seção da junta.

Tabela 4-1– Parâmetro Va e o surgimento da raiz.

Ip A	Ib A	Im A	Nariz mm	VS cm/min	Va m/min	U V	Raiz	N
200	95	121	4,0	5	1,0-1,0	12	Sim	6.3
200	95	121	4,0	5	1,5-1,0	12	Sim	6.4
200	95	121	4,0	5	1,0-1,5	12	Não	6.5
Efeito da Ib (A) no surgimento da raiz								
170	110	125	4,0	5	1,0-1,0	12	Sim	6.6

Observa-se que o tempo de 0,1 s para que Vap atinja 1,5 m/min., é rápido para o sistema alimentador responder, logo um pequeno atraso existe, causando um erro sistemático, que achatou a Vam, mas que manteve a diferença de Vab e Vap aproximado entre os ensaios. Repare que os parâmetros do cordão 6.6 é de fato o mesmo cordão 6 da Figura 4-12, logo é uma sequência na investigação do comportamento da penetração com o surgimento da raiz e as variáveis de maior influência.

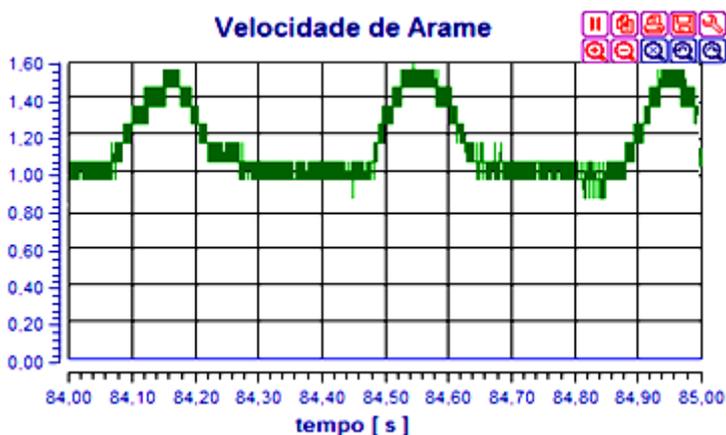


Figura 4-19- Diagrama, alimentação pulsada de arame, do ensaio 6.4 da Tabela 4.1.

Anteriormente foi mostrado neste trabalho que 5 A na corrente média pode alterar o resultado da raiz, e está é uma forte razão para entender o porquê do assunto ser complexo. Quando se deseja aplicar uma quantidade de energia com exatidão, como é o caso da solda de raiz sem fresta na junta e sem backing ou cobre juntas, muitos fatores podem influenciar no resultado da raiz. Quando se solda tubos de pequeno diâmetro o uso de fresta e de cobre junta, geralmente não são possíveis de ser empregados. Isto ocorre devido a condições de acessibilidade, sendo inevitável utilizar metal de adição à junta, pois que os tubos são de espessa parede e a dosagem da energia entre aquela que aquece e a que esfria, devem ser muito bem balanceadas, considerando que o efeito do arame é de retirar calor da poça.

4.3- ANÁLISE DA POSIÇÃO DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME.

O método convencional de alimentação de arame – radial e pela frente do arco – foi comparado com a alimentação de arame por trás do arco na soldagem de raiz em tubos. Os ensaios foram realizados em tubos Schedule 40 de 3” e Schedule 40 de 4”, para contrastar os resultados. O chanfro comercial foi utilizado para exprimir o ganho de produtividade por empregar uma mistura de argônio com 5% de hidrogênio. Um chanfro especial foi desenvolvido para contrastar com o de referencia comercial em produtividade.

4.3.1- Justificativa para realizar os ensaios com a velocidade de arame constante, nos ensaios de repetitividade.

Para visualizar apenas o efeito da VS no TIG alimentado, seria necessário aumentar um pouco a energia de soldagem no sentido de compensar o aumento da velocidade de alimentação do arame, para manter a geometria do cordão constante, em um valor equivalente a energia necessária para compensar a diferença em fundir tal massa. Assim manteve-se a velocidade de alimentação em todos os ensaios, aproximadamente constante, o que pode não ser interessante se considerados os passes subsequentes ao de raiz, devido ao pouco enchimento da cavidade chanfrada na junta. Observou-se também que o controle da raiz fica mais critico quando se adiciona taxas mais elevadas de deposição de arame, além do custo desnecessário devido ao tipo de preparação conferida à junta.

4.3.2- Ensaios de repetitividade.

Com o objetivo de melhor avaliar o comportamento da raiz, um delineamento a priori foi realizado para encontrar a velocidade que conferisse a raiz da solda de forma repetitiva, fator que contribuiu para a análise dos resultados, somente quando um parâmetro repetiu duas vezes é que este foi adotado para a etapa seguinte.

Os valores da Tabela 4-2 representam a matriz fatorial completa 2^3 dos ensaios e apresentam os envelopes de parâmetros formados pelos fatores de controle em dois níveis cada para os ensaios e a média dos valores obtidos mediante medições nas características resposta.

Tabela 4-2 – Tabela dos fatores, níveis e resultados.

Fatores de controle (FC)				Resultados, média dos valores.						
	A	B	C							
NC	Posição de alimentação	Face raiz	Tubo	VS	Lr	Lf	ff	x	hr	At
		mm	mm	cm/min			mm			mm ²
1	Pela frente	2	89	16	4,9	5,4	0,9	3,4	1,4	15,7
2	Pela frente	2	114	16	4,2	4,5	0,9	3,4	1,7	13
3	Pela frente	Esp.	89	9,0	5,3	6,5	0,8	2,3	2,1	27,6
4	Pela frente	Esp.	114	7,5	5,4	6	0,9	2,5	1,7	27,8
5	Por trás	2	89	16	4,6	5,3	0,9	3,6	1,4	14,3
6	Por trás	2	114	16	4,5	4,7	0,9	3,7	0,8	13
7	Por trás	Esp.	89	9,0	4,6	6,8	0,7	2	1,8	25,3
8	Por trás	Esp.	114	7,5	5,7	6,8	0,8	2,2	1,4	27,9

Nos ensaios foi empregado o mesmo ambiente processual. Todos os parâmetros foram mantidos fixos exceto aqueles denominados de fatores de controle A, B e C. A VS foi um valor ensaiado e determinado a priori considerando a penetração total com surgimento da raiz os parâmetros da Tabela 3-3 setor 2 com Va em 0,8 m/min. As condições de contorno afiação do eletrodo e temperatura do corpo de ensaio antes do início da soldagem foram estabelecidos de maneira igual a todos procedimentos de ensaio. As análises foram feitas em amostras de diferentes cordões de soldas em tubos, sendo apenas uma amostra por cordão (360^0) em que se desprezou o início e o final do cordão, apesar destes terem que ser uniformes, pois uma volta completa em torno do tubo nos ensaios foi superior a 360^0 , para conferir um fechamento perfeito do cordão. Para estes ensaios foram preparados 32 segmentos de tubos, que foram montados em um mandril inicialmente com dois segmentos (Figura 4-20 a) e após esfriar completamente a segunda união era

praticada e finalmente com o quarto segmentos de tubos a terceira (réplica) solda de raiz, referente a um dos oito envelopes de parâmetros, eram desta forma realizados (Figura 4-20 b).

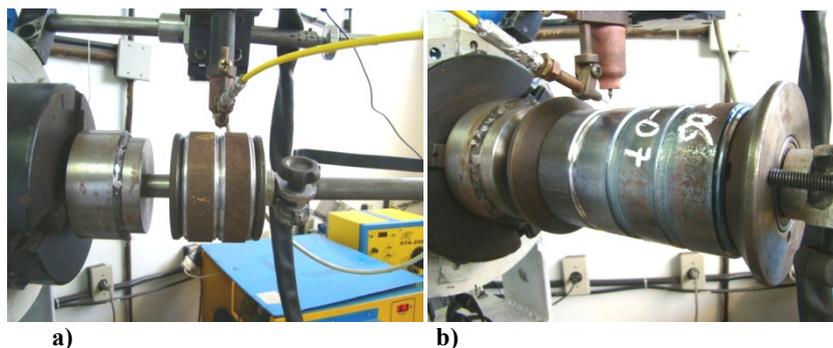


Figura 4-20 – a) união inicial de dois segmentos de tubo, ponteamento autógeno espaçado a 120° ; b) soldas de raiz e posicionamento do quarto segmento de tubo para realização do terceiro cordão de raiz.

A VS é um bom indicador da melhoria da produtividade processual, é a primeira variável que se procura elevar quando o assunto é soldagem.

Por haver diferença de espessura entre os dois tipos de chanfros, e considerando que a energia disponibilizada para a soldagem foi aproximadamente constante, houve a necessidade de empregar duas velocidades distintas para o mesmo perfil especial de chanfro, momento em que se visualizou com maior clareza a diferença pequena, mas existente, da condução de calor entre os tubos de diâmetros diferentes.

Assim, verificou-se experimentalmente que para encontrar a raiz repetitiva os melhores resultados em termos de produtividade, foram aos poucos sendo descartados, a exemplo da face da raiz com 4 mm que não teve boa repetitividade, o que elevou o número de experimentos, e mostrou haver muitos fatores de fundo ou ruídos atuando nos resultados, de tal maneira que se empregou valores mais seguros na montagem da matriz combinatória.

Na saída processual foram realizadas 144 medições, compreendendo seis características mensuradas em oito corridas de ensaios com três réplicas cada. As características resposta foram: a largura do cordão (L_f); da largura da raiz (L_r); da distância que falta para o nivelamento da solda (x); da altura do reforço na raiz (h_r); da área total fundida (A_f); e o fator de forma (ff) que é deduzido indiretamente.

4.3.3- Resultados dos ensaios de repetitividade

Para análise dos resultados, calculou-se o desvio padrão por grupo de ensaio (8 grupos com três réplicas cada grupo), Tabela A.1 e A.2 do apêndice), para cada característica resposta medida.

Tabela 4-3 indica o menor desvio padrão como medida da variabilidade, e a melhor combinação como aquela de menor desvio.

De um modo geral o tubo de menor diâmetro (88,9 mm) apresentou menor variabilidade que o tubo de maior diâmetro (114,3 mm), com menor desvio padrão para quatro dos seis itens observados.

Tabela 4-3 – O menor desvio padrão, e a melhor combinação.

Grandeza	Lr	Lf	ff	x	hr	Af
unidade	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]
> devpad	0,058	0,1	0,005	0,153	0	1
FC	89/2/f	89/esp/t	144/esp/f	89/esp/f	89/esp/f	114/2/f
NC	1	7	8	3	3	2

Como se pode deduzir do gráfico da Figura 4-21, para a variável resposta largura da face ou largura do cordão de solda, para os oito grupos de ensaios realizados, a maior dispersão relaciona o envelope de parâmetros número 5 da matriz com 11,7 % e a menor dispersão, em torno de 1,5 % para o envelope de parâmetros número 7.

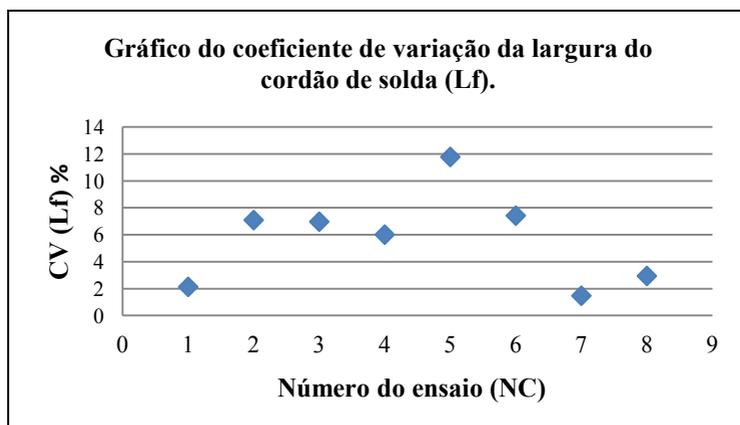


Figura 4-21 – Comportamento da dispersão ao usar o coeficiente de variação nos ensaios de repetitividade, para a variável largura da face (Lf).

Quando o arame foi alimentado pela frente do arco, quatro das seis

grandezas que foram medidas com o menor desvio padrão estavam associadas ao chanfro especial, que repetiu tão bem quanto o chanfro com a face da raiz em 2 mm. Este foi um fator animador, porque a face da raiz em 4 mm simplesmente não repetia com regularidade, sendo a ideia abandonada em razão do chanfro especial preencher a lacuna intermediária entre o nariz de 2 e o de 4 [mm].

Nos gráficos de desvio padrão, Figura 4-22, que exhibe informação semelhante ao desvio padrão relativo ou (CV), foi tomado como exemplo à característica resposta largura da raiz da solda para os 24 ensaios agrupados três a três.

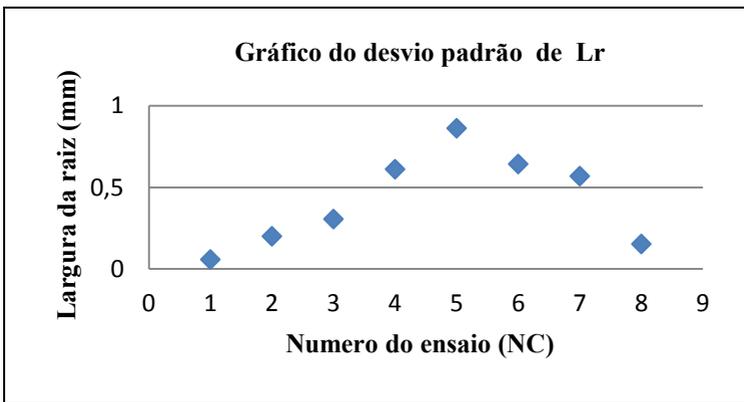


Figura 4-22 – Comportamento da dispersão ao usar o coeficiente de variação nos ensaios de repetitividade, para a variável largura da raiz (Lr).

Embora úteis os gráficos de dispersão não exibam a faixa em que os resultados das medições realizadas se encontram em relação à média, considerando o desvio padrão da população. O mensurando foi classificado como variável, e o resultado destas medições, serão mostrados através do intervalo de confiança das médias.

No gráfico intervalo de confiança da Figura 4-23, cada característica mensurada está relacionada a um envelope de parâmetros distinto, e encontra-se dentro de uma faixa determinada segundo à Equação 4-2.

$$\bar{X} - z_{0,025} \frac{\sigma_X}{\sqrt{n}} \leq \mu_X \leq \bar{X} + z_{0,025} \frac{\sigma_X}{\sqrt{n}} \quad \text{Equação 4-2}$$

Em que \bar{X} é a média das 24 medidas efetuadas e “t” o coeficiente de Student (95,0 % t = 4,30) para uma amostra de tamanho n=3.

No gráfico, a resposta para o fator de controle 1, para $NC=1$, em que os valores coletados para a característica mensurada largura da face foi $\{5,5; 5,3; 5,5\}$ representados no gráfico pelos pontos negros plotados sobre o segmento de reta que representa o intervalo ou a faixa em que os valores devem se encontrar:

$$RM = \bar{x} \pm \frac{t/2.S}{\sqrt{n}} = 5,43 \pm \frac{2,15 \cdot 0,35}{\sqrt{3}} = 5,43 \pm 0,43 \text{ (mm)}$$

$5,0 < 5,43 < 5,86$ (mm) esta é a faixa para o fator 1

Observe no gráfico que a medição de 6,0 mm da amostra encontra-se fora do intervalo, pois o seu valor é menor do que o valor do limite inferior do intervalo.

Os intervalos de confiança para as características medidas no cordão de raiz se encontram no apêndice A deste trabalho. Na Figura A5, Apêndice A, a grandeza adimensional fator de forma apresentou a menor variabilidade para os coeficientes entre 0,92 e 0,94.

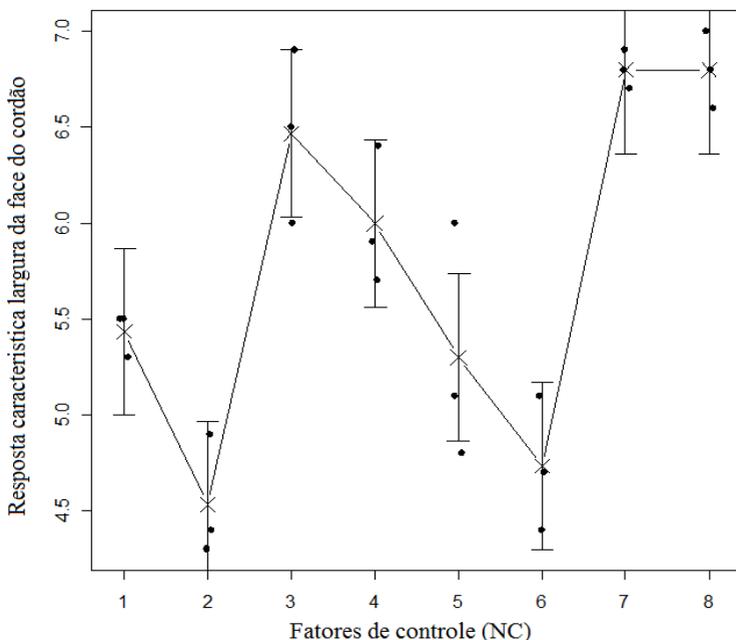


Figura 4-23 – Intervalo de confiança para a característica largura do cordão para 24 soldas de raiz com a mistura de gás Ar+5% H_2 .

A Tabela 4-4, limites do intervalo de confiança, exemplo escolhido para ilustrar as características resposta, neste caso a largura da face.

Tabela 4-4 - Limites do intervalo de confiança, Lf como exemplo.

Fator	Média	DEVPADP	Limite Inferior	Limite Superior
1	5,43	0,356	5,0	5,87
2	4,53	0,356	4,1	4,97
3	6,47	0,356	6,03	6,90
4	6	0,356	5,56	6,44
5	5,3	0,356	4,86	5,73
6	4,73	0,356	4,3	5,17
7	6,8	0,356	6,36	7,23
8	6,8	0,356	6,36	7,23

Como resultados do efeito de se mover um fator de controle de um nível baixo para um nível alto, verifica-se na característica resposta a mudança ocorrida.

É importante que o experimentador tenha uma expectativa pré-qualificada, sobre o comportamento da característica resposta e do resultado esperado. Assim, para obterem-se cordões estreitos na raiz, a característica resposta largura da raiz deve ser mais estreita que a característica largura na face do cordão. Então se esta premissa for verdadeira a qualificação da medida deste parâmetro de saída pode ser assumida na comparação dos resultados.

Primeiro tópico a ser abordado diz respeito à característica largura da face na solda ou largura do cordão. Arcos constritos geram peças de pequeno diâmetro, e na soldagem TIG este valor em média é em torno de 4 a 5 [mm]. Vários fatores podem influenciar esta característica resposta, como o tipo de gás, a corrente de soldagem, o ângulo da ponta do eletrodo e comprimento de arco. MONTGOMERY (2004) pg. 218 [29], cita que a única maneira de avaliar as interações entre variáveis processuais é através de experimentos fatoriais.

Os gráficos mostrados da Figura 4-24 até a Figura 4-29 podem responder a muitas perguntas de forma simples e evidente com relação aos fatores de controle e o efeito nas características resposta.

a) Interpretação do gráfico de interação dos FC e a largura da face.

O fator A, alimentação de arame, tem uma fraca interação com a variável de resposta, porém o fator B, tipo de preparação da junta ou chanfro, possui forte influência na característica largura do cordão, e

verificamos que os cordões com a largura da face mais estreita em média foram obtidos com o chanfro de 2 mm, e avalia-se que o diâmetro do tubo, não influenciou na variabilidade da largura do cordão.

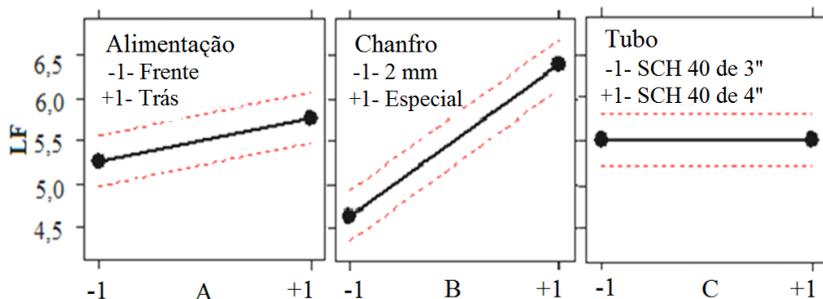


Figura 4-24– Gráfico de interação dos fatores A, B e C e a largura da face.

b) Interpretação do gráfico de interação dos FC e a largura da raiz.

A largura da raiz é um fator bastante observado em soldas de raiz, porque representa uma componente geométrica da medida da raiz da solda. Dentre os fatores investigados, encerra-se que a interação dos fatores A e C, pouco influenciaram na variabilidade da largura da raiz, porém o tipo de preparação da junta denotado pelo perfil geométrico do chanfro mostrou grande diferença quando comparados entre si.

Resulta da análise que o chanfro especial produziu raízes mais largas que o chanfro de 2 mm, considerados a medida da face da raiz.

O fator (B-), chanfro com a face da raiz em 2 mm, é o que melhor correspondeu ao efeito desejado para esta característica de resposta no caso à raiz da solda mais estreita. No caso geral, podemos dizer que ambas as raízes poderiam ser bem mais estreitas na ordem de 1 a 2 mm, as quais são difíceis de serem obtidas com a mistura Ar+5H₂.

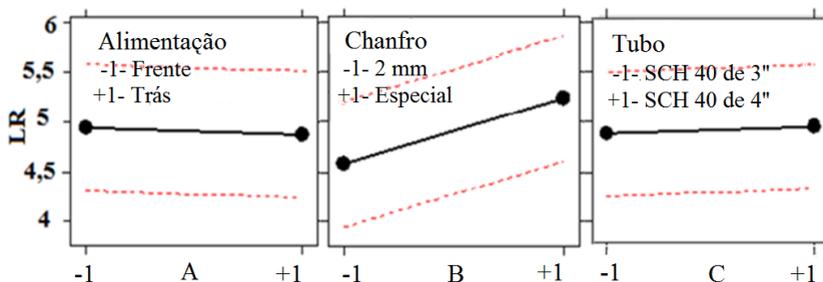


Figura 4-25 – Gráfico de interação dos fatores A, B e C e a largura da raiz.

c) Interpretação do gráfico de interação dos FC e a medida (x), ou altura remanescente.

A medida x, caracterizada como a altura remanescente a ser preenchida com solda em um tubo, é uma medida importante quando abordamos a produtividade na soldagem do passe de raiz com deposição de metal, porque pode diminuir o tempo e os custos na soldagem. Novamente o chanfro especial mostrou minimizar esta grandeza, o que de fato é bom em termos de custo e tempo de execução.

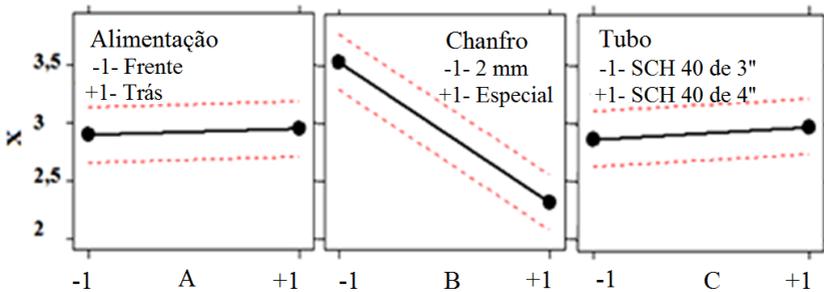


Figura 4-26 – Gráfico de interação dos fatores A, B e C e a altura X.

d) Interpretação do gráfico de interação dos FC e o reforço da raiz.

A característica resposta reforço da raiz (hr), Figura 4-27, apontou para o fator B, nível alto ou chanfro especial, sua maior amplitude, com uma diferença de 0,6 mm. Sabe-se que poucos décimos de milímetros são suficientes para este parâmetro, no entanto se obteve valores acima de um milímetro.

As macrografias da Seção transversal do cordão de solda de todos os gráficos encontram-se no apêndice deste trabalho, bem como tabela de dados. Um valor analítico para a variável resposta seria 1 mm, logo pode-se dizer que o fator chanfro, nível (B+), apresentou o maior afastamento.

Os fatores de controle A e C tiveram influência de menor grau na variação do reforço na raiz da solda.

A combinação que melhor se ajustou a esta característica, a qual apresentou um reforço mais próximo a 1 mm, foi com a alimentação radial de arame por trás do arco com o chanfro de 2 mm e com o tubo *Schedule* 40 de 4" de diâmetro interno. A alimentação de arame radial por trás do arco, devido à curvatura do tubo, não representou um problema como na soldagem de chapas plana em que o arame risca a solda depositada.

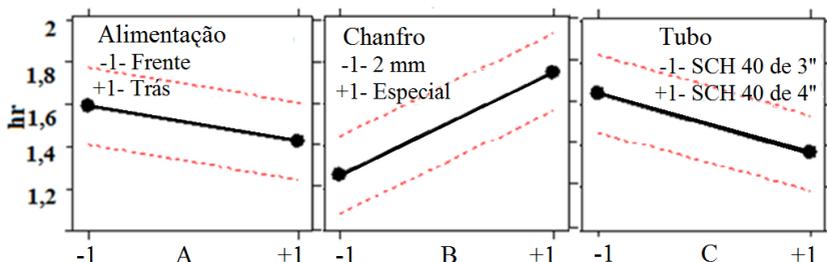


Figura 4-27 – Gráfico de interação dos fatores A, B e C e o reforço na raiz.

e) Interpretação do gráfico de interação dos FC e o fator de forma.

Na Figura 4-28, nota-se que o fator (B-), a maior amplitude é muito próxima ao fator C nível alto. A interação mais pronunciada representada pela combinação dos fatores de controle [A+B+C-] é que representa melhor combinação de valores para a característica mensurada, ou seja, quer-se que o fator de forma seja menor do que 1, pois em uma futura aplicação na soldagem orbital, conjectura-se que existirá menor incidência da poça escoar.

Todos os resultados relacionados ao “ff” foram acima de 0,8 [adm.], mesmo o do exemplo da Subseção (4.2.4), Figura (4-7), mostrou que com o aumento de “VS”, a “Lf” e a “Lr” diminuem, mas “ff” se mantém acima de 0,8. Neste sentido, a melhor combinação nesta relação foi [A+B+C-]. O fator de forma foi influenciado por todos os fatores de controle investigados.

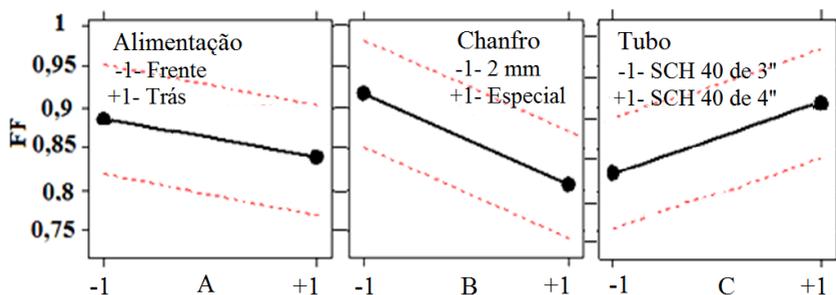


Figura 4-28 – Gráfico de interação dos fatores A, B e C e o fator de forma.

f) Interpretação do gráfico de interação dos FC e a área fundida.

A área fundida, ilustrada na Figura 4-29, assumiu como fator variacional mais expressivo o chanfro especial, havendo dois motivos para isto. O primeiro, é que a taxa de deposição ficou mais elevada na comparação devido à VS ser menor, resultando em uma maior área depositada (Ad), visto ser a Va constante. O segundo motivo, associa também a VS, porque a energia possui maior tempo para agir, assim a área fundida é maior (Af) e o chanfro especial proporciona um maior enchimento da cavidade quando comparada com o de 2 mm. Assim a área total (At) é maior para o fator B+.

Constatou-se a pouca influência dos fatores A e C na característica resposta área fundida, e um diferença média superior a 12 mm² ao empregar o chanfro especial (fator B+).

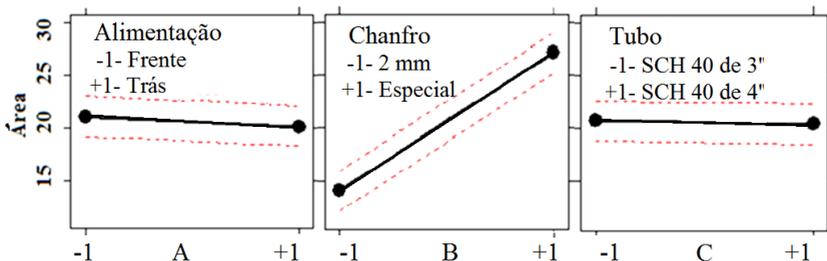


Figura 4-29 – Gráfico de interação dos fatores A, B e C e área fundida (Af).

Na análise das características de resposta, foi mostrado o efeito dos ajustes processuais de maneira ordenada e científica, em que se almejou mostrar os elementos principais que motivaram a variabilidade da raiz da solda nas condições de contorno apresentadas nos ensaios.

4.3.4- Resultados em termos de ganho de produtividade

O ganho de produtividade por soldar com 5% de hidrogênio adicionado ao gás argônio, como gás de proteção, em relação ao gás argônio puro resulta da comparação do incremento obtido em VS para distintas configurações da junta a soldar. Essa questão é mostrada no tópico 4.2.4.1.

Resolveu-se considerar a área remanescente a ser preenchida com solda, após o passe de raiz, como elemento relevante para a melhoria da produtividade. Então uma avaliação é realizada na subseção 4.2.4.2, para

verificar a produtividade em distintas configurações de gases e da junta, sendo resultado expresso na forma do produto do menor tempo de execução da solda, pela menor área remanescente a ser preenchida entre as amostras como a mais produtiva.

4.3.4.1- Ganho de produtividade devido ao emprego de gás mais produtivo considerando diferentes tubos e perfis de chanfros.

A da Tabela 4-5 resulta de uma comparação direta da produtividade entre dois gases de proteção. Então o ganho em produtividade será de 229% para do fator A em relação ao fator P, considerando a VS.

Tabela 4-5 – Desempenho entre diferentes gases e chanfros iguais.

Fator	Tubo 3"	VS(cm/min.)	t(min.)	Tipo de gás	t %
A/P	2 mm	16	1,7	Ar+5%H ₂	229%
B/P	Esp.	9	3,1	Ar+5%H ₂	79%
A/B	2mm/Esp.	Ganho de A em relação a B em min.			77%
P	Padrão	5	5,6	Ar	0 %

Da comparação dos chanfros, resulta que o tempo de execução com o chanfro de 2 mm é 1,8 vezes menor que o tempo de execução do passe de raiz com o chanfro especial. Logo, o ganho em tempo será de 77%.

O chanfro especial (fator B) apresentou um ganho de 79% quando comparado ao fator P. Isso mostra a diferença de produtividade devido ao tipo de gás, mas sem desconsiderar o chanfro.

Na Tabela 4-6, considerando o tubo de maior diâmetro, o resultado em produtividade foi o mesmo que no tubo de menor diâmetro, ou seja, 229% de ganho no valor de VS, na execução do passe de raiz com o chanfro de 2 mm.

Se dois tubos diferentes tiveram a mesma VS garantindo a raiz repetitiva no chanfro de 2 mm, como exposto acima, o mesmo não ocorreu com o chanfro especial que assumiu distintos valores de VS, sendo o menor valor conferido ao tubo maior, devido à condutividade deste ser maior, extraindo, portanto, com maior eficiência a energia armazenada na poça se comparado ao tubo menor.

Desta forma, o ganho de 50% é devido ao fato da VS empregada na solda com o chanfro especial, ser maior em relação a VS do padrão, consideradas as diferenças intrínsecas aos fatores B e P, diâmetro do tubo, gás de proteção e perfil do chanfro.

Tabela 4-6 – Comparativo das VS do tubo de 4”

Fator	Tubo 4”	VS (cm/min.)	t(min.)	Tipo de gás	t %
A	2 mm	16	1,7	Ar+5%H ₂	229%
B	Esp.	7,5	3,7	Ar+5%H ₂	50,%
P	Padrão	5	5,6	Ar	0 %

4.3.4.2- Avaliação da produtividade ao ser considerada a área remanescente a ser preenchida com solda e o tempo de soldagem, para tubos e chanfros diferentes.

Para expressar a produtividade de forma ainda mais ampla, considera-se não só o aumento da VS, mas também a possibilidade de minimizar o tempo global de execução da solda. Outro caminho para a melhoria da produtividade, é através da diminuição do número de passes ou cordões de solda.

A área remanescente a ser preenchida com solda obtida através de medições na amostra dos ensaios de repetitividade e expressa através da média, respectivamente 20,7 mm² para a face da raiz em 2 mm, e a área de 15,6 mm² para o chanfro especial, conforme mostrado na Figura 4-30, Tabela 4-7.

Tabela 4-7- Elementos de chanfro estimativos e medições de área.

Designação	4”	2 mm	Esp.	3”	2 mm	Esp.
1. Face da raiz	S	2	4	S	2	4
2. Largura do rebaixo	C	2,3	2,3	C	2,3	2,3
3. Espessura	t	6,0	6,0	t	5,5	5,5
4. Área A ₁	A ₁	3,3	0,8	A ₁	2,5	0,5
5. Área A ₂	A ₂	9,3	4,6	A ₂	8,1	3,5
6. Área A ₃	A ₃	0	2	A ₃	0	2
7. [2 .(A ₁ + A ₂ + A ₃)]	A _{tr}	25,2	14,9	A _{tr}	21,2	12,0
8. Área A _d	A _d	3,9	8,4	A _d	3,9	7,0
9. Área A _f	A _f	8,6	19,5	A _f	11,2	19,4
10. Área total fundida	A _t	12,5	27,9	A _t	15,1	26,4
11. Altura remanescente	X _r	3,6	2,4	X _r	3,5	2,2
12. Largura máx. chanfro	L	7,9	6,3	L	7,5	5,8
13. Área remanescente	A _r	20,7	15,6	A _r	17,7	12,5

Conforme a Tabela 4-7, para expressar a área remanescente a ser preenchida com solda, empregou-se a média dos valores medidos nas macrografias com o software Image Tools.

Para o tubo de 88,9 mm a área remanescente média será de 17,7 mm² e para o chanfro de 2 mm, e de 12,5 mm² para o chanfro especial.

Então para encerrar este comparativo, expressar-se-á o resultado tomando os dois fatores representativos da produtividade, a menor área remanescente a ser preenchida com solda e o menor tempo de soldagem.

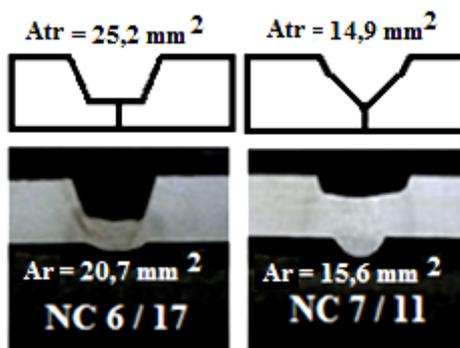


Figura 4-30 – Áreas remanescentes a serem preenchidas com solda para os chanfros de 2 mm e chanfro especial, antes e depois da solda, Sch 40 de 4”.

Desta vez, montou-se uma matriz ortogonalmente alinhada em que o melhor resultado é o menor valor obtido pelo produto dos níveis destes fatores.

Assim pode-se verificar, na Tabela 4-8, que o nível alto representado pelo sinal (+) é na realidade o menor valor da grandeza mensurada, devido às características do mensurando, de tal forma que quanto menor o tempo e a área remanescente a ser preenchida com solda, melhor será a produtividade.

Tabela 4-8 – Matriz fator e níveis

	t[<i>min.</i>]	Área [mm ²]	Interpretação
1	-	-	Pior
2	-	+	?
3	+	-	?
4	+	+	Melhor

As Tabela 4-9 e Tabela 4-10 a seguir, exemplificam a combinação dos fatores e níveis e elucidam os seus resultados.

Tabela 4-9 – Schedule 40, 4”, desempenho dos chanfros.

	t[min.]	Área remanescente [mm^2]		Interpretação
1	3,7	20,7	76,59	Pior
2	3,7	15,6	57,72	Especial
3	1,7	20,7	35,19	2 mm
4	1,7	15,6	26,52	Melhor

Tabela 4-10- Schedule 40, 3”, desempenho dos chanfros.

	t[min.]	Área remanescente [mm^2]		Interpretação
P	5,6	15,1	84,56	2 mm/Ar
1	3,1	17,7	54,72	Pior
2	3,1	12,5	38,75	Especial
3	1,7	17,7	30,09	2 mm
4	1,7	12,5	21,25	Melhor

Interpretação dos resultados

Constata-se primeiramente que o chanfro de 2 mm foi mais produtivo que o chanfro especial e o tubo de 3” mais produtivo que de 4” (porque foram considerados o tempo como função da VS e não do comprimento de solda, a qual de fato seria maior no tubo de 4”). As considerações gerais são comentadas a seguir.

- O parâmetro do chanfro padrão é o menos “produtivo”, porém é repetitivo e utilizado com eficiência. Neste caso, a palavra “produtividade” é questionada.
- O resultado 1 é possível de ser realizado mas não há interesse.
- O resultado 2 resultou do chanfro especial
- O resultado 3 resultou do chanfro de 2 mm
- O resultado 4 é possível, mas para ser obtido dever-se-ia que determinar uma situação de chanfro e taxa de deposição de arame tendo como critério a raiz repetitiva. Entende-se que seria necessário também determinar a energia de soldagem.
- Se comparados os dois tubos verifica-se que o tubo Schedule 40 de 3” e chanfro de 2 mm, com 30 ($\text{mm}^2 \cdot \text{min.}$) representa a melhor combinação, no quadro geral.

- O segundo melhor bloco de resultados de ensaio foi com o chanfro de 2 mm e tubo Schedule 40 de 4”.
- O terceiro melhor bloco de resultados de ensaio foi com o chanfro especial e tubo Schedule 40 de 3”.
- O quarto melhor bloco de resultados de ensaio foi com o chanfro especial e tubo Schedule 40 de 4”.

Algumas considerações ainda sobre o chanfro especial

O chanfro especial apresenta, na comparação com o chanfro de 2 mm, uma menor remoção de material na etapa de preparação da junta, que confere menor área a ser preenchida com metal de solda. Tal fato pode diminuir o número de passes durante sua execução, e ainda assim se constituir em um parâmetro viável à soldagem com cabeçote orbital. Este resultado implica desta forma, menores tempos envolvidos na montagem do dispositivo. Ainda devido à mistura de gás pode-se obter 50% a mais na velocidade de execução do passe de raiz, o que poderá ser um bom diferencial em lucratividade. Estas considerações são relevantes porque expõe a possibilidade do mais lucrativo necessariamente não ser o mais produtivo, visto que acima se afirmou que o chanfro de 2 mm é mais produtivo. Uma avaliação neste segmento somente será plena se todas as variáveis “customizadoras” forem relevadas na avaliação global (custo, tempo, qualidade), havendo ainda outras questões objetivas e subjetivas que englobam este assunto.

4.3.5- Considerações sobre a eficiência de fusão dos ensaios de repetitividade

A eficiência de fusão não representa necessariamente uma medida da produtividade. Cada processo de soldagem apresenta uma faixa tão larga quanto possa se variar a intensidade da energia e a relação com a aplicabilidade em termos de material a soldar e objetivo da operação. Mas apesar de todas as limitações ao realizar medições, e associar estes resultados a modelos matemáticos, para expressar valores mais precisos a esta grandeza, haverá sempre um grande contingente de ruídos agindo nestes resultados. Dezenas de fontes de incerteza foram identificadas no decorrer deste trabalho, e se estimadas, estas verificariam o alargamento da faixa de medição da eficiência de fusão. No entanto, seria necessário ainda testar diferentes aplicações na determinação de uma faixa mais geral para expressar a eficiência de fusão. Sabe-se que a mistura do hidrogênio

ao gás argônio eleva a capacidade do processo de fundir material, em relação ao argônio puro, logo a eficiência de fusão deve ser maior quando se emprega a mistura com hidrogênio devido à elevação da condutividade térmica e da tensão do arco, além de fechar ou de conferir maior constrição a esse, conforme HOOIJMANS, citado por SCHWEDERSKY [16].

No caso do TIG alimentado a eficiência de fusão (η_f) é fornecida pela Equação 4-3.

$$\eta_f \eta_t = (V_T \cdot H) / (Pm), \text{ sendo adimensional} \quad \text{Equação 4-3}$$

E para determinar o volume total, V_T (mm^3), considerando a VS (mm/s) basta multiplicar-se $A_T \times VS$.

Desta forma, a energia necessária para aquecer e fundir 1 mm^3 do material aço carbono, representada pela variável H, a qual sua unidade pode ser expressa em $[\text{J}/\text{mm}^3]$. Segundo AWS (2001), citado por SCHWEDERSKY, o valor assumido para a entalpia de fusão é de $10,5 [\text{J}/\text{mm}^3]$ e para a eficiência térmica do arco TIG é $6,7 \pm 0,5$ adimensional.

Diante destas informações, decidiu-se avaliar o comportamento da eficiência de fusão considerando os ensaios de repetitividade.

O gráfico da Figura 4-31 foi construído considerando a área total fundida que resultaram de medições em macrografias e usou-se a média das áreas totais de três réplicas por número de ensaio, mais os elementos constituintes na equação apresentada.

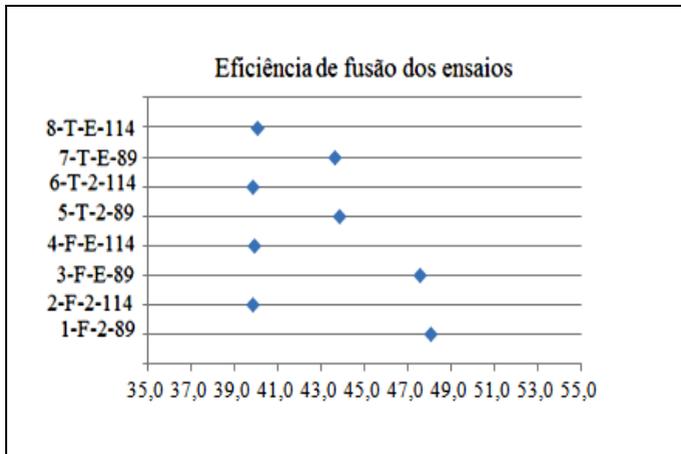


Figura 4-31- Eficiência de fusão dos ensaios de repetitividade

Os resultados da Figura 4-31 permitem realizar algumas considerações sobre a eficiência de fusão dos ensaios de repetitividade, tais como:

- O tubo maior apresentou a mesma eficiência de fusão para diferentes perfis de chanfro e de posição de alimentação do arame, cujo valor foi em média 40%.
- O tubo de menor diâmetro, na observação da posição de alimentação de arame, com ocorrência por trás do sistema arco/poça, sendo independente do perfil de chanfro, apresentou uma eficiência de fusão de 44%.
- O tubo de menor diâmetro, com a posição de alimentação de arame pela frente do arco, apresentou uma eficiência de fusão de 48% sendo independente do perfil de chanfro.

Desta forma, no tubo de maior diâmetro, os fatores de entrada se combinaram de tal maneira que os resultados aleatórios foram aproximadamente iguais.

No tubo de menor diâmetro ocorreram as seguintes distinções:

A primeira está relacionada à eficiência de fusão do tubo menor que foi maior em relação ao tubo de maior diâmetro.

A segunda, que a alimentação radial do arame por trás do sistema arco/poça foi menor que o resultado da eficiência de fusão em relação à alimentação radial pela frente do arco, em um valor estimado de 4%. Com relação a esta distinção, aponta-se que o tubo de menor diâmetro apresentou em média a mesma eficiência de fusão em torno de 46 %, relacionando-se aos resultados com o tubo de maior diâmetro que foi de 40%. Desse último relato entende-se que diferenças de condução devem existir entre os tubos de diferentes diâmetros.

Em outro ensaio, cujos parâmetros estão descritos no parágrafo abaixo, considerou-se a avaliação das fontes de incertezas de medição do processo e estimou-se o resultado básico e a tolerância em $0,5 \pm 0,08$. Para isso, foram assumidos nos cálculos os valores já mencionados neste trabalho para a entalpia de fusão e para o rendimento térmico do processo. Portanto, a faixa de medição encontrada para o TIG alimentado radialmente pela frente do arco, variou de 42 a 58 %.

Os parâmetros estabelecidos para esse ensaio foram: $I=150$ A; $U=13,1$ V; $V_a=1,0$ m/min.; arame ER70S-6 de diâmetro, 1 mm; com VS de 0,28 m/min.; cordão de raiz executado em chapa plana de aço carbono de

9,85 mm, com nariz de 1,5 mm, chanfro V e gás de proteção argônio com 5% de hidrogênio.

4.4- CONSIDERAÇÕES SOBRE A FREQUÊNCIA DE PULSAÇÃO NA SOLDAGEM ORBITAL 5G.

Para melhor comparar a variação da frequência de pulsação foram realizadas três soldas de raiz em tubos de 114 mm de diâmetro (cordões A, C e D), com a mesma configuração de chanfro, na qual se empregou os parâmetros do padrão de referência (Cordão B). As macrografias revelaram soldas com bom acabamento na face e na raiz, e para cada solda variou-se a frequência de pulsação.

A Tabela 4-11 mostra, a exemplo das soldas, neste caso a do cordão A, que apresentou uma poça (L) de 5 mm de diâmetro, considerando-se a Vs ajustada no processo em 5 cm/min.. Isso resultou em uma sobreposição de 30,6 % a qual pode ser visualizada na Figura 4-32. Embora a frequência do pulsado seja de 0,24 Hz, neste caso considerada baixa, a poça avança 3,47 mm por pulso. Para percorrer o caminho igual ao diâmetro da poça, observa-se que a corrente terá deferido mais de 1,4 pulsos sobre a mesma. Tal exemplo evidencia um primeiro esboço da mecânica do pulsado, que envolvem estudos da pressão do arco no pico de corrente para avaliar o impulso mecânico deferido pelo arco à poça e seus efeitos.

A sobreposição pode ser estimada pela Equação 4-4

$$S(\%) = (L - X) \cdot 100\% / L \quad \text{Equação 4-4}$$

Tabela 4-11 – Sobreposição do cordão e número de pulsos sobre a poça.

Variáveis	F	T	L	VS	NPSP	X	Sobreposição
Unidade	Hz	s	mm	cm/min.	pps	mm	%
Cordão A	0,24	4,17	5	5	1,4	3,47	30,6
Cordão B	2,4	0,42	5	5	12	0,42	91,7
Cordão C	1	1	5	5	6	0,83	83,3
Cordão D	5	0,2	5	5	25	0,2	96

Os parâmetros ajustados no processo de soldagem são mostrados na Tabela 4-12 e os parâmetros fixados a priori foram: face da raiz em 2,0 mm; eletrodo de EWTh-2 2,4 mm de diâmetro; com vértice do cátodo em 60°; mistura de argônio com 5% de hidrogênio; 12 l/min. de vazão; arame

ER70-S6 de 1 mm de diâmetro. Já as Figuras (4-30, 4-31 e 4-32) mostram os respectivos cordões de solda (A, C e D).

Tabela 4-12 – Ensaios na posição 5G na bancada orbital.

Parâmetro	Ib	Ip	Im	tb	tp	F	Vab	Vap	Vam	VS	Ad	Aporte
	A		s			m/min.			mm ²		kJ/cm	
A	82	170	105	3	1,1	0,24	0,5	1	0,6	0,05	9,9	11
B*	82	170	104	0,3	0,1	2,5	0,5	1	0,6	0,05	9,8	10,9
C	61	145	103	0,5	0,5	1	0,5	0,7	0,6	0,05	9,4	10,8
D	82	170	126	0,1	0,1	5	0,5	1	0,7	0,06	9,8	11

* Solda realizada com cabeçote orbital.

Na solda mostrada na Figura 4-32, foi empregada uma frequência de pulsação dez vezes menor que a do parâmetro de comparação (cordão B) e obteve-se uma solda com a raiz regular em toda a extensão e praticamente sem reforço, com a face do cordão de solda escamada, porém de boa aparência, típica de um pulsado de baixa frequência e de pequena sobreposição. Observa-se a oxidação da raiz.



Figura 4-32 – Solda 5G, cordão A, pulsado de 0,24 Hz.

A solda mostrada na Figura 4-33 mantém a mesma energia da solda do cordão B, apesar dos parâmetros diferenciarem-se entre si. Porém observa-se uma razão cíclica de 0,5, ou seja, tempos iguais entre o pulso e a base. Esta mecânica de pulsação pode ser percebida pelo operador através da visão e da audição, e deixa evidente que na fase de pulso da corrente ocorre à fusão intensa de material e no tempo de base a contração da poça devido à diferença de temperatura entre o pulso e a base da corrente, em concordância com DZELNITZKI (2000) [15]. A solda de raiz mostra também uma boa aparência com pouco reforço na raiz e bom acabamento na face da solda, reproduzindo-se por toda a extensão de forma regular.



Figura 4-33 – Solda 5G, cordão C, com pulsado de 1 Hz.

Na Figura 4-34 a solda realizada com frequência de pulsação em 5 Hz e razão cíclica de 0,5, ou seja, com o dobro da frequência de pulsação da corrente da solda do cordão B. A solda foi reproduzida de forma eficiente, mostrando que o material ensaiado é de boa soldabilidade, pois foi possível realizar a solda com único parâmetro.

Nota-se que a corrente média subiu de 103 A para 126 A devido à diminuição do tempo de base. E o mesmo ocorreu para a taxa de deposição que se elevou em 20%, e resultando em uma solda de boa aparência e com pouco reforço na raiz, como a solda do cordão B.

O aumento de energia foi compensado pelo aumento da taxa de deposição do arame frio, mantendo o balanço térmico, porém com uma maior área fundida. Segundo RAMPAUL [28], um cordão de raiz bom é aquele que não há poros, fusão incompleta, falta de penetração ou excesso deste. A ausência de defeitos deste tipo qualifica o procedimento como viável à soldagem de raiz.



Figura 4-34 – Solda 5G, cordão D, com pulsado de 5 Hz.

4.5- SOLDAGEM 6G NA BANCADA COM ALIMENTAÇÃO RADIAL DE ARAME.

Os parâmetros fixos desta série foram gás ($Ar+5\%H_2$), eletrodo de 3,2 mm de diâmetro (EWTh-2), tensão eficaz média de 12,5 V e alimentação radial de arame 1,0 mm. Foram realizadas 5 soldas de raiz em tubo Schedule 40 de 88,9 mm de diâmetro externo, na posição 6G, conforme parâmetros da Tabela 4-13.

Tabela 4-13 – Ensaios na posição 6G na bancada de estudo orbital.

Parâmetro	Ib	Ip	Im	tb	tp	F	Vab	Vap	Vam	VS	Nariz	Aporte
	N ^o	A		s		Hz		m/min.			mm	kJ/cm
1	82	170	104	0,3	0,1	2,4	0,5	1	0,63	0,07	2,8	8,74
2	82	170	104	0,3	0,1	2,4	0,5	1	0,63	0,08	2,8	7,28
3	125	225	150	0,3	0,1	2,4	0,8	1,5	0,98	0,15	2,5	5,65
4	125	225	150	0,3	0,1	2,4	0,8	1,6	1	0,18	2,5	4,74
5	125	225	150	0,3	0,1	2,4	0,9	1,8	1,12	0,17	2,5	5,0

Nessa tabela, os parâmetros referentes aos cordões 1 e 2 (parâmetros de referência comercial empregados em soldas com cabeçote orbital), foram testados na bancada de ensaio para a soldagem de tubos estáticos e rotacionais.

Devido à diferença de potência em virtude do emprego da mistura de gás Ar+5%H₂, o valor da VS foi para o cordão 1, aumentado de 5 para 7 cm/min., o nariz da junta de 1,8 para 2,8 mm. O resultado desse ensaio resultou em reforço excessivo na raiz.

Para o cordão 2, novamente elevou-se o valor de VS para 8 cm/min., a raiz foi julgada por sua geometria através do fator de forma, medido em 0,57 e o reforço da raiz em 0,6 mm, sendo essas medidas consideradas como aceitáveis, porém a raiz não apresentou integridade em toda a sua extensão.

Com o interesse em aumentar a produtividade, na execução do cordão 3, a corrente média foi elevada de 104 A para 150 A e foi mantida a frequência do pulsado em 2,4 Hz. A face da raiz da junta passou de 2,8 para 2,5 mm. Como resultado, a raiz da solda apresentou um fator de forma em 0,9, tendendo a forma retangular.

Os cordões que seguem, tiveram acréscimo de Va e VS para determinar um melhor ponto do ajuste processual, que ocasionou um efeito de esfriamento da poça, visto que o cordão 5 apresentou a raiz mostrada na Figura 4-35.

Ressalta-se então que soldas de raiz podem ocorrer com maior energia e menor aporte, não sendo o aporte térmico uma referência confiável. Também pode se adicionar que pequenos ajustes à taxa de deposição de arame resultam em significativo efeito na configuração da raiz.

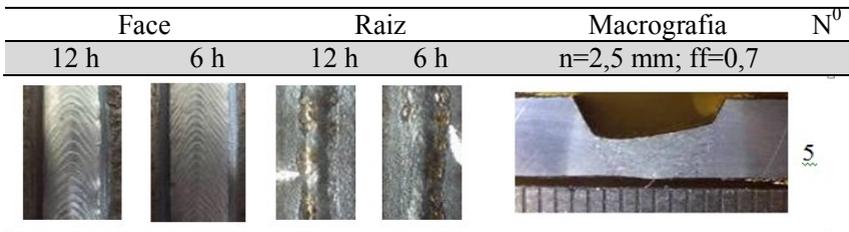


Figura 4-35 – Cordão 5, face raiz e macrografia da Seção da solda 6G.

4.6- ENSAIOS NA BANCADA PLANA COM DIFERENTES ÂNGULOS E POSIÇÕES DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME.

Um estudo que não foi solda de raiz, mas que contribuiu para compreender melhor as diferenças entre modos distintos de alimentação, o qual consistiu na simples deposição de cordões em chapa (bead-on-plate) de aço baixo carbono ABNT 1008 com 8 mm de espessura. Os parâmetros pré-ajustados foram: Eletrodo EWTh-2 de diâmetro 3,2 [mm] e ângulo da ponta de 60^o; corrente (DCEN) de 150 [A]; Va em 2 [m/min.] com diâmetro de arame de 1,0 [mm]; Vs em 15 [cm/min.]; ângulo de ataque em zero grau e gás Ar+5%H₂ com vazão de 10 [l/min.].

Como critério para iniciar os ensaios analisou-se a molhabilidade do cordão e então o parâmetro foi adotado para os ensaios com ângulos de alimentação em 20^o e 60^o (graus) em relação ao eixo eletrodo (0^o). As duas técnicas distintas de alimentação de arame combinadas com a posição de alimentação (frente ou por trás), resultaram em 16 combinações e foram atribuídos valores distintos para cada caso, de tal forma que ambas as tochas funcionassem em condições de similaridade.

A Figura 4-36, exibe os elementos considerados fatores de controle, observando que DLEA se diferencia de DEA apenas pelo fato do arame passar mais lateralmente a face usinada do eletrodo do que da ponta, devido ao ângulo de alimentação.

Com objetivo de estudo processual, quer-se verificar a estabilidade do processo e conhecer melhor algumas características resposta, comparando-se dois ângulos de alimentação. Para isso, um arranjo combinatório fatorial completo, sem réplicas, foi montado para testar ambas as tochas e seus respectivos ângulos de alimentação em dois níveis.

Os fatores de controle (A, B, C, D) sendo nível baixo (-), nível alto (+): ângulo de alimentação (A-) radial (60^o) e (A+) Tangencial (20^o); posição de alimentação pela frente (B-) e por trás do arco (B+); O DEP em

5 mm (C-) e 3 mm (C+); O DEA terá um valor baixo (D-) e um valor alto (D+) indexado ao ângulo de alimentação, Tabela 4-14.

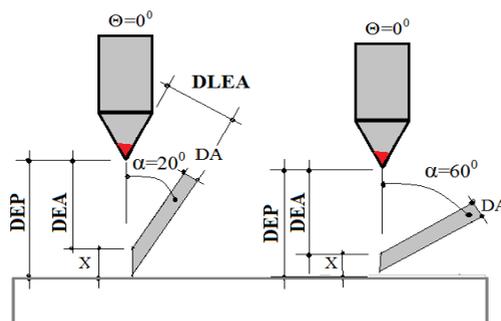


Figura 4-36– Relações geométricas importantes no processo TIG alimentado.

A coluna “interação” na Tabela 4-14 revela o fator de nível elevado na interação entre os fatores. Desta forma (0) representa a mais fraca interação, e (A.B.C.D), a interação de elevado nível dos fatores.

Tabela 4-14 – Ensaio fatorial com TIG alimentado.

NC Fatores e níveis (AR=1)					
	A	B	C	D	Interação
1.	Radial	Trás	DEP=3 mm	DEA= 1,8 mm	B
2.	Radial	Trás	DEP=3 mm	DEA= 2,4 mm	B.D
3.	Radial	Trás	DEP=5 mm	DEA= 1,8 mm	B.C
4.	Radial	Trás	DEP=5 mm	DEA= 2,4 mm	B.C.D
5.	Radial	Frente	DEP=3 mm	DEA= 1,8 mm	0
6.	Radial	Frente	DEP=3 mm	DEA= 2,4 mm	D
7.	Radial	Frente	DEP=5 mm	DEA= 1,8 mm	C
8.	Radial	Frente	DEP=5 mm	DEA= 2,4 mm	C.D
NC Fatores e níveis (AT=2)					
	A	B	C	D	Interação
9.	Tangencial	Trás	DEP=3 mm	DLEA=1,0 mm	A.B
10.	Tangencial	Trás	DEP=3 mm	DLEA=1,4 mm	A.B.D
11.	Tangencial	Trás	DEP=5 mm	DLEA=1,0 mm	A.B.C
12.	Tangencial	Trás	DEP=5 mm	DLEA=1,4 mm	A.B.C.D
13.	Tangencial	Frente	DEP=3 mm	DLEA=1,0 mm	A
14.	Tangencial	Frente	DEP=3 mm	DLEA=1,4 mm	A.D
15.	Tangencial	Frente	DEP=5 mm	DLEA=1,0 mm	A.C
16.	Tangencial	Frente	DEP=5 mm	DLEA=1,4 mm	A.C.D

As macrografias das Figuras (4-37 e 4-39) mostraram que os parâmetros escolhidos resultaram em cordões de aparência aceitável na sua maioria, revelando ao leitor uma referência de ajuste processual com dois métodos de alimentação distintos, em condições de ensaios operacionalmente viável a ambos os ângulos de alimentação e de posicionamento de arame. Ao se comparar os resultados, percebe-se que a série de 1 R a 8 R revelou em média menor área fundida em relação a série de 9 T a 16 T e apresenta um perfil geométrico semi circular.

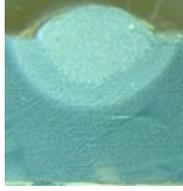
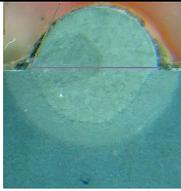
Alimentação de arame por trás do arco			
DEP 3 mm		DEP 5 mm	
1R	2R	3R	4R
			
Lf=7,0 Rf=2,5; P=2,4; m=69 ⁰ A=26 mm ²	Lf=6,1;Rf=2,4; P=1,6; m=101 ⁰ A=15,5 mm ²	Lf=7,5; Rf=2,3; P=1,9; m=42 ⁰ A=21,5 mm ²	Lf=6,9; Rf=2,0; P=2,7; m=37 ⁰ A=23,8 mm ²
9T	10T	11T	12T
			
Lf=6,2; Rf=2,9; P=3,1; m =65 ⁰ A=36,0 mm ²	Lf=7; Rf=2,7; P=2,0; m =52 ⁰ A=23,0 mm ²	Lf=7; Rf=2,4; P=2,9; m =62 ⁰ A=26,0 mm ²	Lf=8,1; Rf=2,1; P=3,4; m=42 ⁰ A=28,5 mm ²

Figura 4-37 – Macrografias dos ensaios realizados em bancada plana com alimentação tangencial (ATT) e radial (ART) alimentado por trás do arco.

Na sequência de quadros, Figuras (4-38 e 4-39), observam-se esses parâmetros em relação ao ponto de intersecção do arame com a poça. Verificam-se a influência de DEP e DEA, fatores de controle, na posição de entrada do arame em relação ao sistema arco/poça. Quando se aumenta o DEP o arame aproxima-se mais ao centro da poça, porém DEA tem

influência inversa, de forma que o arame pode deslocar-se em direção à borda externa da poça, tornando impraticável a alimentação radial posicionada por trás, como ilustrados nas Figura 4-38, cordão 2 R. Observa-se ainda que em tubos o mesmo não aconteceria.

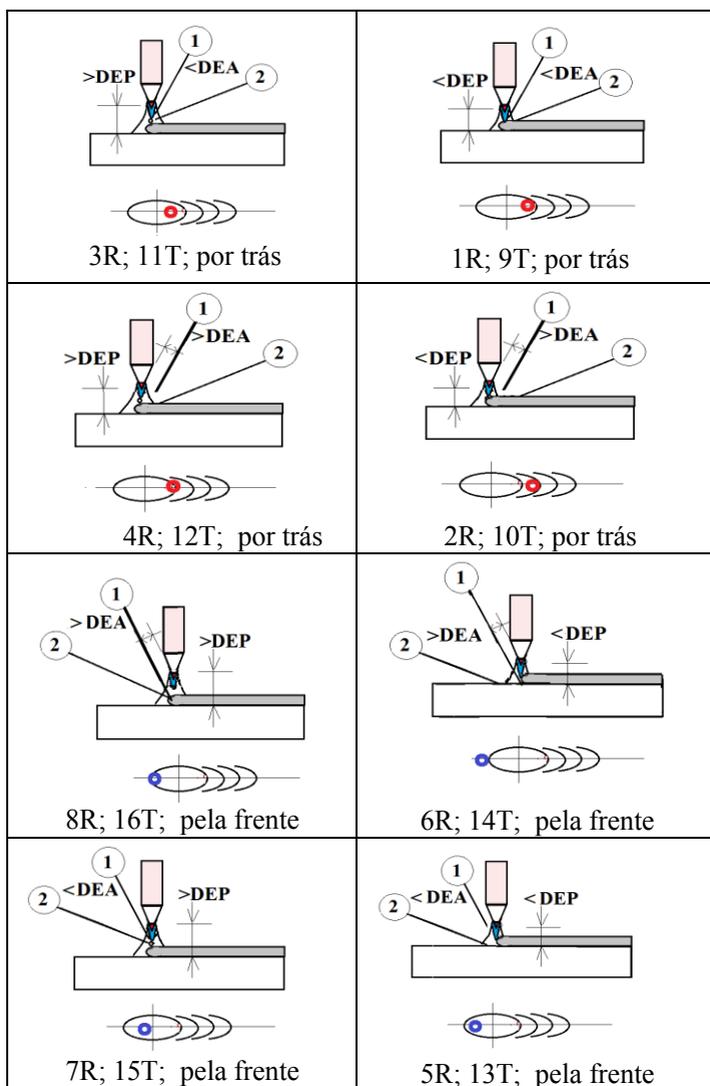


Figura 4-38– Situação dos ensaios com ângulo de alimentação tangencial (1) e radial (2), posicionado pela frente e por trás do arco.

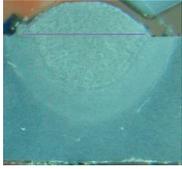
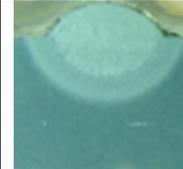
Alimentação de arame pela frente do arco			
DEP 3 mm		DEP 5 mm	
5R	6R	7R	8R
			
Lf=8,8; Rf=2,2; P=3,4; m=42 ⁰ A=34,0 mm ²	Lf=7,3; Rf=2,0; P=1,4; m=47 ⁰ A=18,7 mm ²	Lf=6,8; Rf=1,8; P=2,6; m=42 ⁰ A=26,0 mm ²	Lf=6,5; Rf=2,1; P=2,4; m=48 ⁰ A=26,8 mm ²
13T	14T	15T	16T
			
Lf=6,7; Rf=2,6; P=2,9; m=53 ⁰ A=31,2 mm ²	Lf=8,1; Rf=2,5; P=2,4; m=47 ⁰ A=32,0 mm ²	Lf=8,5; Rf=2,3; P=2,9; m=36 ⁰ A=38,7 mm ²	Lf=8; Rf=2,4; P=3,0; m=40 ⁰ A=39,7 mm ²

Figura 4-39– Macrografias dos ensaios realizados em bancada plana com alimentação tangencial (ATF) e radial (ARF) alimentado pela frente do arco.

Foi adicionada à análise, Tabela 4-15, o resultado da interação entre os fatores processuais (A,B,C e D), e mostrar-se-á primeiramente a característica resposta área fundida. Assim pode-se dizer com maior propriedade que o fator (A+) influenciou mais em média na variação da área do que os demais fatores considerados no controle, e concluímos que a soldagem praticada com a alimentação tangencial de arame (20⁰), fundiu uma área em torno de 34,5% maior do que a praticada com a alimentação radial.

O segundo fator de controle de maior efeito na magnitude da grandeza medida, área fundida (ou volume fundido), deveu-se ao fato do arame ser alimentado posicionado pela frente do sistema arco/poça, sendo 24,6 % maior se comparado ao fator (B+). Os fatores C e D influenciaram a característica resposta área fundida em menor grau, diante das condições e parâmetros empregados nos ensaios.

Observam-se diante da literatura dois aspectos: o primeiro que se o arame for alimentado posicionado pela frente do arco, a área fundida poderia ser menor, porque o calor do arco deixaria de arder diretamente sobre as faces da junta, devido à presença do arame. O segundo que a alimentação tangencial funde mais arame, porque aproveita melhor o calor do arco devido às isotermas de maior temperatura havendo ainda maior percurso para a troca térmica entre o arco e o arame.

Tabela 4-15 – Efeitos sobre a área devido à influência dos fatores e níveis.

Área	Fator A		Fator B		Fator C		Fator D	
	A- RAD	A+ TAN	B- FRT	B+ TRS	C- DEP	C+ DEP	D- DEA	D+ DEA
Nível Baixo	23,7 mm ²		30,9 mm²		27,0 mm ²		29,9 mm²	
Nível Alto	31,9 mm²		24,8 mm ²		28,6 mm²		25,7 mm ²	
Diferença	8,2 mm ²		6,1 mm ²		1,6 mm ²		4,2 mm ²	

A respeito da primeira indagação literária, em uma solda de raiz o crescimento da poça é mínima, sob a advertência da perda do controle da raiz da solda se a taxa de deposição for elevada. Na deposição em chapa grossa a tendência da poça é crescer por dois motivos. Primeiro, a taxa de deposição na chapa plana o crescimento se dá no reforço, na face da junta, em contraste com a soldagem de raiz, que o metal de solda é para conferir reforço na raiz. Segundo, que a taxa de deposição pode ser maior, logo a poça cresce e o arame a toca em um menor percurso. Então a situação criada no ambiente processual revela uma possível explicação, a de que a área fundida média dos ensaios com alimentação de arame posicionada pela frente do arco ser maior se comparado à por trás.

Com relação à introdução tangencial, ter se destacado com tanta diferença na área fundida média, pode confirmar a literatura de que o arame usa a energia de uma região do arco que seria possivelmente dissipada, e essa passa a contribuir com a fusão do arame, resultando em mais calor disponível entre a poça e o arco e as somas destes dois fatores resultariam em uma região total fundida maior.

A combinação, [A+, B-, C+, D-], que seria o equivalente a interação (A.C), ensaios 15, Tabela 4-14 e Figura 4-39 quadro 15 T, confirma os resultados médios com relação a maior área fundida (mm²).

Seguindo nas análises dos resultados, Tabela 4-16, a penetração também analisada, apresentou similaridade de resultados com a área fundida.

Percebe-se que a maior diferença entre os fatores de controle foi entre os ângulos de alimentação de arame, apresentando os corpos de ensaio praticados com alimentação tangencial, 21,7% em média, mais penetração do que a radial. Os fatores C+ e D- influenciaram em média 12,5 % a mais na penetração em relação aos seus pares, C- e D+.

Tabela 4-16 – Efeitos sobre a penetração devido à influência dos fatores.

	Fator A		Fator B		Fator C		Fator D	
	A-	A+	B-	B+	C-	C+	D-	D+
Penetração	RAD	TAN	FRT	TRS	DEP	DEP	DEA	DEA
Nível Baixo	2,3 mm		2,6 mm		2,4 mm		2,7 mm	
Nível Alto	2,8 mm		2,5 mm		2,7 mm		2,4 mm	

Verifica-se que na alimentação tangencial com DLEA em 1,0 mm e DEP em 5 mm, que nesta situação o arame entra na poça mais próxima ao centro e com DLEA em 1,4 mm para a mesma situação já entra mais próximo à borda da poça líquida, mas não é tão crítico quanto se DEP assumisse o valor de 3 mm, pois o afastamento ainda seria mais a borda ou fora da poça. Estas considerações refletem em termos de estabilidade do processo porque a poça cresce e encontra o arame mais acima do nível da peça, o qual havia sido ajustado a DEP, visto que nestes ensaios não foram usados o AVC.

Tabela 4-17, que os fatores A e C apresentaram efeito mais significativo sobre a variável resposta reforço na face da solda (Rf), sendo a interação de nível alto (A.B), experimento 9, que apresentou maior altura do reforço medido na face da solda. No sentido mais geral, todos os fatores contribuíram de forma semelhante.

Tabela 4-17 – Efeitos sobre o reforço na face devido à influência dos fatores.

	Fator A		Fator B		Fator C		Fator D	
	A-	A+	B-	B+	C-	C+	D-	D+
Reforço face	RAD	TAN	FRT	TRS	DEP	DEP	DEA	DEA
Nível Baixo	2,2 mm		2,3 m		2,5 mm		2,4 mm	
Nível Alto	2,5 mm		2,4 mm		2,2 mm		2,3 mm	

Como última característica resposta apresenta-se o ângulo de molhamento. Os fatores que exerceram maior influência foram o fator de controle DEP e a posição de alimentação do arame. Verifica-se que na interação que o efeito do arame em riscar o cordão, influenciou o crescimento do ângulo de molhamento, quando o fator DEP foi 3 mm sendo o arame alimentado radialmente e posicionado por trás do sistema arco/poça.

Ainda essa condição apresentou em média a maior altura do reforço de toda a amostra, 2,65 mm, ensaios 1R, 2R 9T e 10T. Reconhece-se que quanto maior a altura do reforço e menor a largura da face, maior foi a convexidade do cordão.

São mostrados os gráficos de efeitos para a característica molhabilidade na Figura 4- 40.

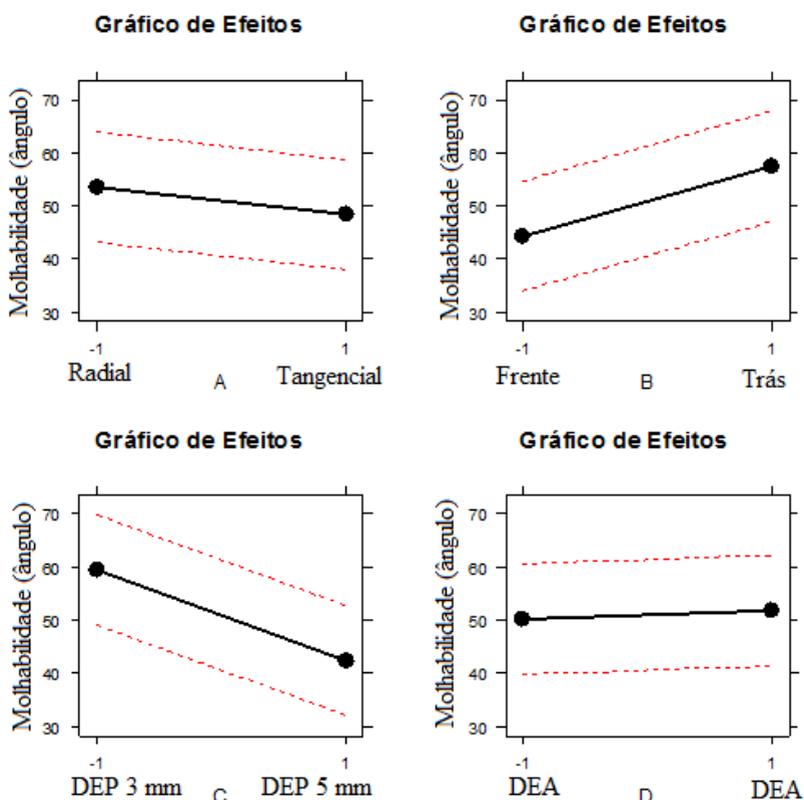


Figura 4- 40- Gráficos de interação de fatores para a característica resposta ângulo de molhamento. Excel – suplementos – DOE- gráfico de efeitos.

Com o comprimento de arco mais alto, ou DEP em 5 mm, em média verificou-se que o ângulo de molhamento foi mais baixo em torno 40%. Os ajustes de DEA, que tiveram valores específicos indexados, foram estipulados nos experimentos para garantir a estabilidade ou viabilidade processual. Os efeitos do fator DEA foram atenuados para a característica resposta, molhabilidade, com o entendimento qualitativo desenvolvido em consultas literárias, ensaios preliminares e deduções geométricas equacionáveis aplicadas na determinação dos níveis deste fator. A medida da molhabilidade é de grande importância para o ajuste processual no TIG arame frio.

4.7- ESTUDO DE PARÂMETROS NA SOLDAGEM DE RAIZ NA BANCADA PLANA COM ALIMENTAÇÃO TANGENCIAL

Ensaio com o TIG arame frio com alimentação tangencial, deve-se a relatos recentes sobre a aplicação desta técnica.

A técnica da alimentação tangencial de arame é aplicada principalmente por trás do arco, pois o arame poderá tocar no eletrodo por passar muito próximo a superfície lateral desse, havendo a possibilidade de contaminação do eletrodo quando posicionado a frente do arco de soldagem. A estabilidade do arco é sempre um forte fator a considerar na soldagem, sob a advertência de interrupção do procedimento.

Para verificar tais afirmações foram realizadas soldas com alimentação tangencial, em chapa de aço carbono, ABNT 1010, com 3,2 mm de espessura, havendo fresta de 0,7 mm na junta. O controle para avaliar a qualidade do cordão depositado compreende a inspeção na raiz e na face da solda da junta de topo, realizada na posição plana (1G), Figura 4-41.

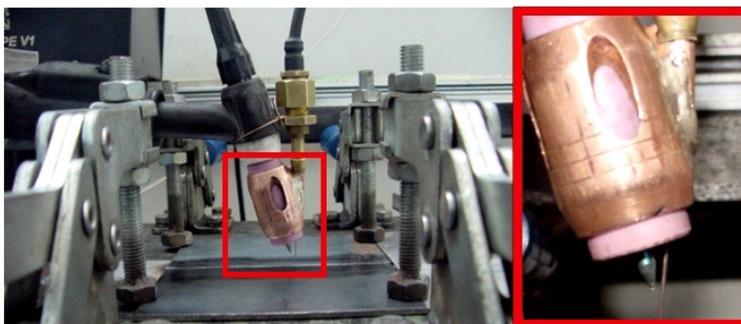


Figura 4-41– Bancada plana, tocha adaptada à alimentação tangencial.

Os ensaios foram conduzidos com TIG DCEN, alimentado com arame ER70S-6 de 0,6 mm de diâmetro e eletrodo de tungstênio 2,4 mm de diâmetro torinado a 2% e gás Ar+5% H₂ com 12 l/min. de vazão. A tocha manual sem refrigeração foi adaptada, para soldagem em curtos trechos até 250 A. O ângulo de ataque em 15^o deixou o arame praticamente perpendicular à superfície da chapa caracterizando o método empurrando. Nesta etapa alcançou-se a VS de 0,6 m/min. A medida DLEA foi de 1,5 vezes o diâmetro do arame e o DEP 2,5 mm.

Por questão de simplicidade empregou-se a corrente contínua constante desejando-se alcançar o limite de 250 A, para isso foi necessário encontrar a VS que conferisse à raiz da solda na junta de topo. Há consenso, na bibliografia sobre soldagem, ser o limite de 250 A para o TIG DCEN, tanto em aplicações em soldas de raiz em tubos como em relação a descontinuidades na solda e dificuldades de inicialização e finalização da solda.

Na macrografia da solda, o cordão é largo na face e estreito na raiz e a taxa de deposição foi somente a necessária para conferir a geometria do cordão, que deve apresentar reforço na raiz e na face. Os parâmetros relacionados ao cordão e à taxa de deposição e à área depositada encontram-se na Tabela 4-18.

Tabela 4-18 – Taxa de deposição e área do cordão depositado.

	Td (kg/h)	Ad (mm ²)
Cordão 11 (120 A)	0,307	4,3
Cordão 13 (200 A)	0,427	2,2
Cordão 16 (250 A)	0,6	2,1

Empregando-se correntes de soldagem, em níveis cada vez mais elevados, buscou-se a raiz da solda através do ajuste da VS. Alguns destes ensaios em chapa plana podem ser vistos na Tabela 4-19.

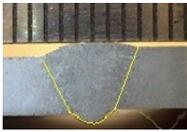
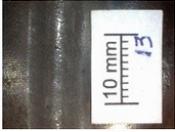
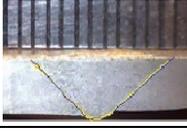
Os resultados mostraram-se satisfatórios, ao passo que apresentou uma raiz mais estreita comparada à largura da face, ainda, caracterizando uma solda realizada em passe único com penetração total. A condição mais crítica de alimentação do arame, neste caso, é pela frente do arco TIG, em que se supõe ser agravada pelo diâmetro do arame. Dependendo da Va do arame esse pode tocar na junta e flexionar contaminando o eletrodo ou atravessar a poça. Mas o fato de se usar um arame mais fino, além de exigir pouca rigidez estrutural para ser guiado, e a sua fusão é rápida.

Verificou-se que o arame fino apresentou facilidade em fundir o que tornou viável a apresentação das soldas. Em algumas peças o arame

atravessou a raiz da solda, isto, atribui-se a velocidade estar acima da capacidade do sistema arco/poça em fundir. A transferência de metal desejada para este tipo de alimentação é por meia ponte, situação em que o arame toca suavemente a poça, um regime de deposição entre goticular e ponte completa (o arame toca em cheio a poça).

O parâmetro de melhor resultado foi o de 200 A, porque apresentou integridade da raiz e a face lisa, isenção de mordeduras, bom ângulo de molhamento, além de apresentar geometria em cunha e fator de forma 0,36, apesar do pouco reforço na face.

Tabela 4-19 – Resultados na bancada plana com alimentação tangencial.

Dados		Face	Raiz	Macrografia
IM	VS =0,15 Va =2,3 120 m/min. A 3/6=ff			
IM	VS =0,40 Va = 3,2 200 m/min. A 2,5/7,0=ff			
IM	VS =0,60 Va = 4,5 250 m/min. A 2/6=ff			

4.8- VIABILIDADE DE SOLDAGEM 6G COM ALIMENTAÇÃO TANGENCIAL DE ARAME.

Diante dos resultados com alimentação tangencial e corrente constante na bancada plana, decidiu-se verificar a viabilidade de emprego na soldagem de raiz em tubos. Para realizar esta solda foi desenvolvida outra tocha para alimentação tangencial, com um sistema mais robusto para guiar o arame, conforme mostrado na Figura 3-9 (b), Subseção 3-2. Em tal solda, adiciona-se a observação de que a força do arco foi suficiente para garantir a deposição na posição sobre cabeça (6h) sem que houvesse a ponte entre o arame e a poça.

A face e a raiz da solda como também a macrografia do cordão de raiz são mostradas, na Figura 4-42, para a posição dita comumente crítica

na soldagem. Foi constatado que para o fator de forma acima de 1, mostrado na posição 6h, não houve o escorrimento da solda.

A soldagem de raiz com alimentação tangencial ainda é uma novidade e há fortes indícios de que é plenamente viável a sua aplicação.

Estes últimos ensaios foram exploratórios porque pouco se usou a corrente constante neste estudo, e seu emprego não está descartado frente ao uso da corrente pulsada.

Com o resultado desta solda, pode-se concluir que a alimentação tangencial é viável na soldagem orbital, e que deve ser mais explorada na soldagem de raiz tendo como par o emprego da mistura de gás com hidrogênio.

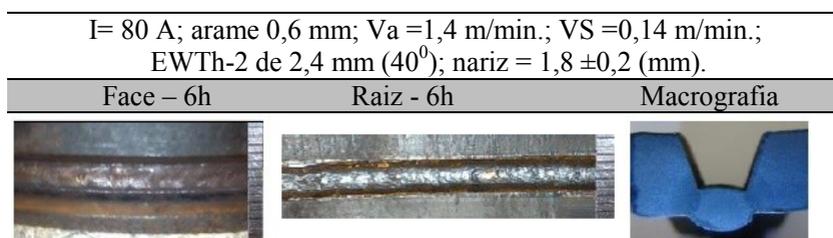


Figura 4-42 - Solda 6G, realizada com alimentação tangencial de arame.

Na soldagem em todas as posições de tubos espessos envolvendo a raiz, uma gama de parâmetros e de ajustes processuais pode resultar em raiz, mas apenas uma minoria entre estas possibilidades resultarão em raízes repetitivas.

Questões envolvendo forma de deposição do arame e métodos de alimentação de arame, as quais englobam fenômenos, tais como tensão superficial, transporte de massa através do arco (goticular sobre cabeça) e a determinação do tipo mais adequado à aplicação de tais técnicas se tangencial ou radial, por ponte completa, meia ponte ou em gotas, representam elementos na discussão ao se tratar do processo TIG com alimentação automática do arame.

5- CONCLUSÕES

No decorrer deste trabalho se encerram vários pareceres conclusivos. Alguns destes pareceres vamos procurar evidenciar melhor, conforme segue.

A mistura de argônio com 5% de hidrogênio mostrou ser mais produtiva do que o argônio puro. Uma diferença que podemos destacar entre os dois gases é que a raiz das soldas em forma de cunha pode ser facilmente obtida com argônio e com a mistura rica em hidrogênio, a raiz das soldas tende à forma retangular. A forma de cunha é por possuir uma área reduzida em relação a retangular é mais interessante à soldagem orbital.

Um ganho em VS de 229% foi obtido devido a simples troca de gás de proteção na soldagem de raiz de um tubo Schedule 40, com face da raiz em 2 mm. Com o chanfro especial o ganho em VS ou a diminuição em tempo de arco aberto para o passe de raiz foi de 79,7%. Porém, houve um maior nivelamento da cavidade chanfrada na junta, podendo representar um ganho em economia de arame e de tempo de preparação de junta, etc.

A largura da face e a largura da raiz, área fundida e altura do reforço na raiz, foram influenciados pelo tipo de chanfro, atingindo maiores valores quando se usou o tipo especial. Outras características da saída processual fator de forma, altura do reforço na raiz e eficiência de fusão tiveram influência simultânea de todos os fatores envolvidos, sendo que o valor mais elevado para a eficiência de fusão foi com o tubo de 3", com arame alimentado radialmente pela frente do arco, conforme é praticado convencionalmente, em uma junta de topo com a face da raiz em 2 mm.

Quanto à integridade da solda, item que relaciona toda a extensão do cordão de raiz, houve a ocorrência de falhas, generalizando os cordões. Pode-se dizer que esta generalização apresentou uma ocorrência de aproximadamente de 10% da extensão, havendo para um mesmo envelope de parâmetros réplicas com cordões íntegros e com cordões falhos, apesar do elevado fator de forma. Mostra-se através desses relatos o quanto deve ser preciso o processo de obtenção da raiz com a mistura de gás Ar+5%H₂. Há, sobre este assunto pouca bibliografia. De maneira geral, as soldas, em alguns casos, apresentaram poro por aprisionar hidrogênio na etapa de solidificação.

Empregou-se com maior sucesso o AVC na soldagem com o tubo rotacionando, devido a suas características dimensionais. Observa-se que o AVC uma vez mantendo a tensão constante não contribuiu com o

aumento da pressão do arco sobre a poça e desta forma em um reforço maior que o devido, porque nos ensaios de repetitividade se observados as macrografias, vê-se que a face da solda é plana, seja não apresenta convexidade no reforço da face do cordão de raiz, sendo este um critério útil no TIG alimentado automaticamente, porque como a energia é balanceada o surgimento de reforço (convexo) é sinal de ausência da penetração total ou raiz. É importante salientar que para tipo de gás deve-se ter um ensaio de calibração antes de ajustar a tensão no AVC, para que se possa obter o comprimento de arco (DEP) desejado.

No emprego da corrente pulsada, verifica-se que a penetração ocorre de forma escalonada, se observadas as seções das macrografias em intervalos de 5 (A) em média ou incrementalmente somados à corrente de pulso em 15 A, ora havendo o aumento da penetração, ora havendo alargamento em detrimento da penetração. Ao aumentar a corrente contínua pulsada em média 20 A, verifica-se boa linearidade e não mais se percebe o escalonamento da penetração. Nessa situação, obviamente o contorno é muito específico e é difícil generalizar. A penetração decresce em média e linearmente com aumento da VS para uma mesma energia, mas o contrário pode também ocorrer. Então um pequeno crescimento da penetração pode ocorrer com certo aumento da VS. Nesse momento, a energia atua no alargamento do cordão passando a atuar no incremento positivo da penetração, devido a aspectos de transferência ou condução de calor.

Com relação à aplicação de tochas com bocais de cobre, material utilizado para fazer as adaptações necessárias aos distintos métodos de alimentação de arame, pode-se dizer que resistiram bem a correntes médias testadas (até 230 A). Porém, houve apenas refrigeração do eletrodo e não do bocal. No caso da alimentação tangencial de arame, o tubo condutível deve ser de cobre ou cerâmico e preferencialmente intercambiável, visto que o sistema necessita manutenção com certa frequência e o diâmetro do orifício deve se ajustar perfeitamente ao diâmetro do arame em uso.

6- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante das experiências vivenciadas no decorrer deste trabalho, observa-se que outras atividades inerentes à natureza do mesmo se completam ao prosseguir os estudos considerando-se as sugestões levantadas a seguir.

- Mais ensaios comparativos entre corrente constante e pulsada devem ser explorados na soldagem de raiz em tubos de parede espessa, adaptados ao perfil de chanfro, na busca da produtividade.
- A alimentação radial deve ser mais bem explorada na soldagem de raiz em geral, e na soldagem de raiz de tubos estáticos (orbital), não havendo motivos consolidados para que a mesma não receba a parametrização necessária à estabilidade para esta aplicabilidade processual.
- Com relação à bancada de trabalho CNC, um motor mais potente deveria ser incorporado a essa, ou um AVC mais leve, pois o motor não possuía torque suficiente dentro do sistema de redução montado para operar sem o auxílio de contrapesos. Acoplamentos devem ser reavaliados, eliminando folgas ao transferir potência do sistema motor para redutor e deste para o eixo arvore. Aplicar tratamento de superfície ou materiais com menor suscetibilidade a corrosão. Avaliar e incorporar tecnologia semelhante às empregadas aos cabeçotes orbitais. Reintegrar um estudo avaliando o projeto do sistema e o projeto de tolerâncias das peças, harmonizando o projeto global da bancada à qualidade desejada na solda.
- Foram observados no decorrer deste trabalho que o ângulo de alimentação, a distância eletrodo peça (DEP) e a distância eletrodo arame (DEA) podem influenciar, juntamente com a velocidade de alimentação de arame, a ocorrência de três tipos básicos de forma de deposição do arame. A globular, para baixas velocidades de alimentação e o arame não avança dentro do arco podendo a gota assumir valores maiores que o diâmetro do arame. A goticular, em que o arame não toca a poça, permanecendo dentro do arco assumindo à gota, valores menores ou até maiores que o diâmetro do arame. E a transferência por ponte, que pode apresentar duas variantes, a ponte completa e a meia ponte, sendo que na ponte completa todo o diâmetro

do arame é imerso na poça. A meia ponte é caracterizada por fração do diâmetro do arame ser imerso na poça, diferenciando-se portanto da completa. Todos os regimes de transferência descritos sofrem a influência da energia do arco, e são determinados a partir da definição do ângulo de alimentação, V_a , diâmetro de arame e tipo de material. Então a filmagem e um estudo mais contundente poderiam ser feito neste sentido em futuros trabalhos com o TIG alimentado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DELGADO, L. C. **Estudo E Desenvolvimento Do Processo TIG Com Alimentação Automática Do Arame**. Dissertação De Mestrado Em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2000.
- [2] ZEEMANN, A. **A Soldagem GTAW (ou TIG)**. Revista ABS (Associação Brasileira de Soldagem), v. Ano I – nº 6, p. 7-13., 2005.
- [3] MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. 362 p. 3. ed.
- [4] CIRINO, L. M. **Estudo Dos Efeitos Da Polaridade Na Soldagem Com Corrente Contínua E Alternada Pelos Processos TIG E MIG/MAG**, UFSC, Florianópolis, Fevereiro 2009.
- [5] CUNHA, T.V. **Desenvolvimento de Equipamento e de Metodologia de Parametrização para a Soldagem Orbital TIG**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. UFSC. Florianópolis, 2008.
- [6] HADDAD, G. N.; FARMER, A. J. D. Temperature measurements in gas tungsten arc. **Welding Journal**, n. 64, p. 339s–342s., december 339s–342s. 1985.
- [7] FAN, H. G.; NA, S.- J.; SHI, Y. W. Numerical simulation of current density in gas. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, Part B: Journal of Engineering Manufacture, v. 211, n. Part B, p. 321-327, 1997.
- [8] MODENESI, P. J. **Introdução à Física do Arco Elétrico e Sua Aplicação na Soldagem dos Metais**. Belo Horizonte. 2009.

- [9] MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J. **Características do arco de soldagem TIG em diferentes atmosferas**. UFMG, Belo Horizonte. Acesso em: 12 abril 2011. Disponível em: <www.demec.ufmg.br/site/cursos/arquivos/158pdf>.
- [10] LUCK, J. Dicas para melhorar o início de arco GTAW. **Welding Journal em Português**. Appleton, USA, v. 1, n. 1, p. 27 a 30, outubro 2011.
- [11] KOU, S. **Welding Metallurgy**. USA: John Wiley and Sons, 2003.
- [12] LANCASTER, J. F. The Physics of Welding. **Pergamon**, Oxford, p. 73-79, 1984.
- [13] TUSEK, J.; SUBAN, M. Experimental Research of the Effect of Hydrogen in Argon as a Shielding Gas in Arc Welding of High-Alloy Stainless Steel. **International Journal of Hydrogen Energy**, p. 369-376, 2000.
- [14] LABSOLDA. **Ensaio com Diferentes Gases e Tipos de Corrente com o Processo TIG**. Relatório interno, Florianópolis 2008.
- [15] DZELNITZKI, M. D. TIG - Direct-Current Welding with High-Frequency Pulses, an Interesting. Essen: **EWM Hightec Welding GmbH**, 2000.
- [16] SCHWEDERSKY, M. B. **Um estudo da eficiência e produtividade dos principais processos de soldagem a arco**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. UFSC. Florianópolis, 2011.
- [17] DUTRA, J.; F. RIBAS; M. A. OLIVEIRA; GOHR Jr. **Desenvolvimento dos Processos TIG/Plasma Alimentados Automaticamente para Aplicação Manual em Reparos de Cavitação em Turbinas Hidráulicas**. Acessado em abril 2010. <http://www.labsolda.ufsc.br/noticias/2005/citene1_2005.pdf>

- [18] IMC-SOLDAGEM. **Manual do Equipamento**, Florianópolis. <<http://www.imc-soldagem.com.br/minitec.html>>. Acessado em 10 janeiro de 2012
- [19] FORTAIN, J.; RIMANO, L.; VAIDYA, V. Innovative Process Improves Welding of Sheet Metal Parts. **Welding Journal**, p. pp. 38-s–46-s, January 2008.
- [20] RATCLIFFE, L. Orbital Welds Take Flight. **Welding Journal**, California, June 2002.
- [21] WEINGARTNER, A. B. **Desenvolvimento De Um Sistema De Controle De Altura e de Abertura Do Arco Elétrico Para O Processo De Soldagem TIG**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, UFSC, Jan. 2012.
- [22] D, YAPP.; S, A. B. Recent developments in high productivity pipeline welding, **J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.**, v. vol.26, n. no.1 , Rio de Janeiro, Jan./Mar. 2004.
- [23] JASNAU, U.; SUMPF, A.; ROSTOCK. **Laser hybrid welding with high power fibre laser – new chances for use of laser**, Acessado em 25 de outubro de 2009. Disponível em: <<http://www.ipg Photonics.com>>.
- [24] JARVIS, B. L.; AHMED, N. U. Development of keyhole mode gas tungsten arc welding process. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. Vol. 5 , 2000. ISSN No. 1.
- [25] API. Specification for Line Pipe - **API SPECIFICATION 5L**. Washington, D.C: [s.n.], 2004. p. 47-48.
- [26] FELIZARDO, I. **Qualificação de Procedimentos de Soldagem em Tubos**, Cusco, 2007. Acessado em 27 de outubro de 2010. Disponível em: <congresso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf/27/27-14.pdf>.

- [27] WORKBOOK, W. **Gas Tungsten Arc Welding of Pipe**. [S.l.]: [s.n.], 2002.
- [28] CORRÊA, M. A. **Diretrizes de Projeto e Qualificação Metrológica de Sistemas de Medição de Grandezas Elétricas em Processos de Soldagem a Arco**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. UFSC. Florianópolis, 1999
- [29] MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 3. ed. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, v. 2003, 706 p. p.
- [30] RAMPAUL, H. **Pipe Weld Procedures**. 2nd. ed. New York: Industrial Press Inc., 2003.

APÊNDICE A – TABELAS REFERENTES AOS ENSAIOS DE REPETITIVIDADE.

Tabela A.1 – Experimentos no tubo de 89 mm

Tubo 89 mm, <i>Schedule 40</i> , parede 5,5 mm												
Face da raiz 2 mm						Face da raiz especial						
Por trás			Pela frente			Por trás			Pela frente			
Exp.	1	3	5	2	4	6	7	9	11	8	10	12
VS	16	15,8	15,8	16	16	16	8,2	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
Va	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Lr	3,7	5,4	4,8	4,9	5	4,9	5,1	4	4,8	5,6	5,2	5
Lf	4,8	5,1	6	5,3	5,5	5,5	6,8	6,9	6,7	6,9	6,5	6
ff	0,77	1,06	0,80	0,92	0,91	0,89	0,75	0,58	0,72	0,81	0,80	0,83
x	3,2	3,7	3,9	3,5	3,1	3,6	2,2	1,8	1,9	2,3	2,1	2,4
hr	0,9	1,4	1,8	1,1	1	2	2	1,5	1,8	2,1	2,1	2,1
Áf	12,3	16	14,5	15,7	14,3	17,2	26,4	22,5	27	27,8	29,7	25,4

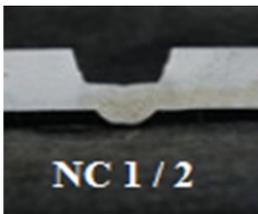
Tabela A.2 – Experimentos no tubo de 114 mm

Tubo 114 mm, <i>Schedule 40</i> , parede 6,0 mm												
Face da raiz 2 mm						Face da raiz especial						
Por trás			Pela frente			Por trás			Pela frente			
Exp.	13	15	17	14	16	18	19	21	23	20	22	24
VS	16	16	16	16	16	16	7,5	8	8	7,5	7,5	7,5
Va	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Lr	5	3,8	4,8	4	4,4	4,2	5,5	5,7	5,8	4,7	5,5	5,9
Lf	5,1	4,7	4,4	4,3	4,9	4,4	6,6	6,8	7	6,4	5,7	5,9
ff	0,9	0,8	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,9	1,0
x	3,4	4	3,8	2,9	3,5	3,8	2,5	2,1	2,1	2,4	2,8	2,4
hr	0,8	0,8	0,8	1,1	1	1,4	1	1,7	1,5	1,3	2	1,9
Áf	16	12	11,2	12	14	13	29	29	24	25	26,4	32

A Tabela A.3, Mostra a diagramação fatorial completa de 3 fatores e 2 níveis ordenada . Observe que o nível baixo para o fator de controle introdução do arame foi convencionado (-F) e o nível alto (+T) ou simplesmente - A e +A. Analogamente seguem os demais fatores de controle e seus respectivos níveis. As Figuras A.1 são as macrografias dos ensaios com três réplicas e as Figuras de A2 até A6, são gráficos dos intervalos de confiança das características analisadas no ensaio de repetitividade.

Tabela A.3 – Ensaios de repetitividade matriz fatorial

Fatores de controle				Resultados, valores médios.						
NC	A Introdução de arame	B mm Nariz	C mm Tubo							
				VS	Lr	Lf	ff	x	hr	At
0	Pela frente	2	89	16	4,9	5,4	0,9	3,4	1,4	15,7
A	Por trás	2	89	16	4,6	5,3	0,9	3,6	1,4	14,3
B	Pela frente	Esp.	89	9	5,3	6,5	0,8	2,3	2,1	27,6
A.B	Por trás	Esp.	89	9	4,6	6,8	0,7	2	1,8	25,3
C	Pela frente	2	114	16	4,2	4,5	0,9	3,4	1,7	13
A.C	Por trás	2	114	16	4,5	4,7	0,9	3,7	0,8	13
B.C	Pela frente	Esp.	114	7,5	5,4	6	0,9	2,5	1,7	27,8
A.B.C	Por trás	Esp.	114	7,5	5,7	6,8	0,8	2,2	1,4	27,9



FRENTE



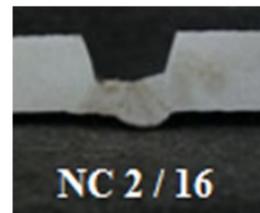
89 mm



2 mm



FRENTE



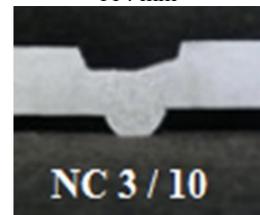
114 mm



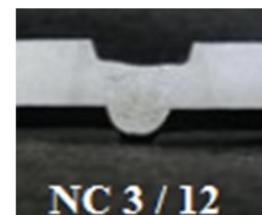
2 mm



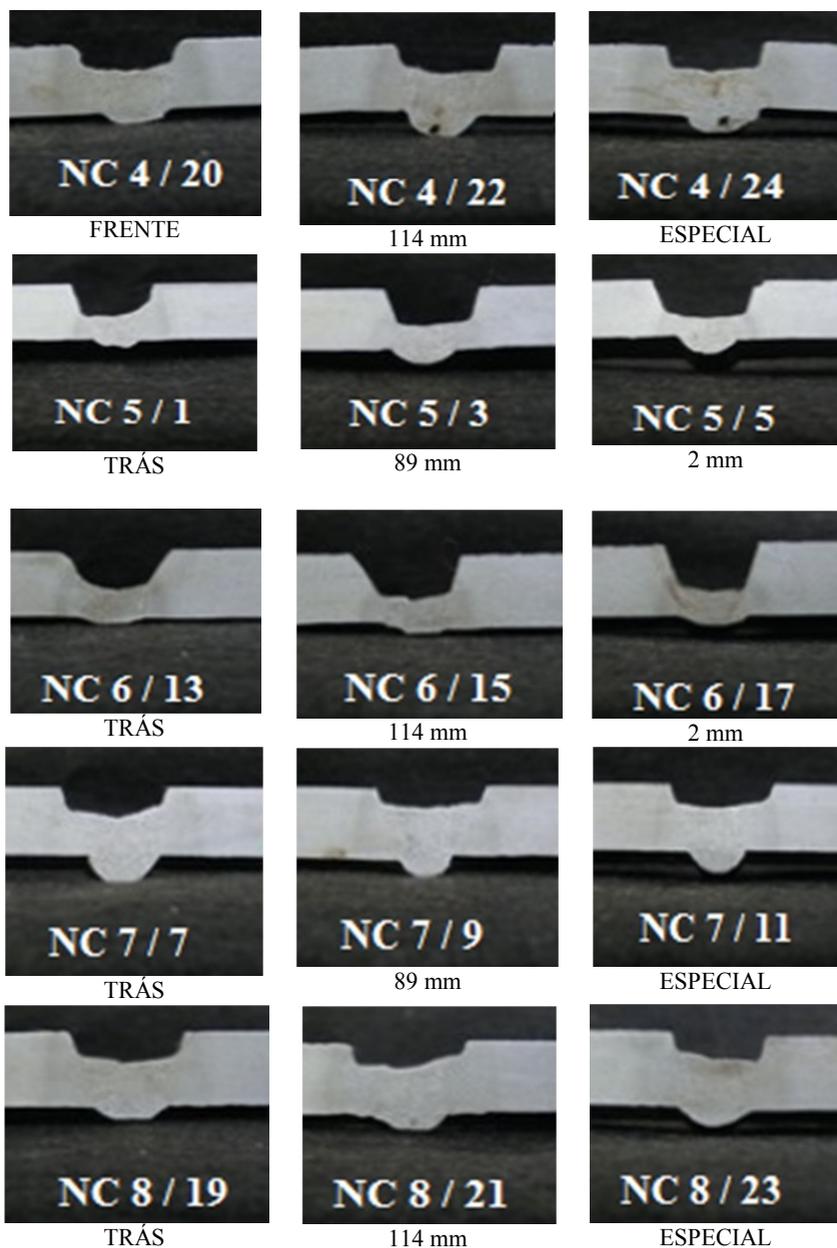
FRENTE



89 mm



ESPECIAL

Figura A.1 – Macrografias dos ensaios de repetitividade com três réplicas.

Continuação da Figura A.1 – Macrografias dos ensaios de repetitividade com três réplicas.

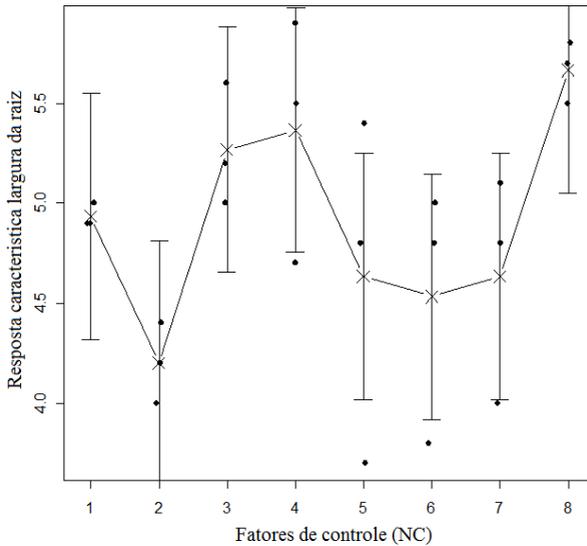


Figura A.2 – Intervalo de confiança, Largura da raiz.

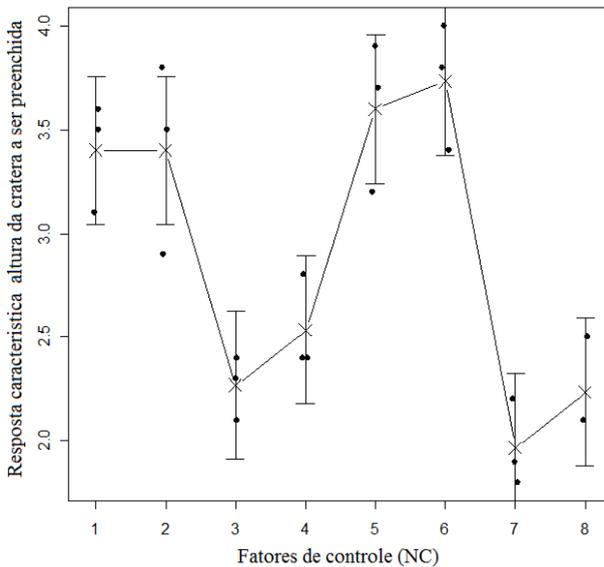


Figura A.3 – Intervalo de confiança, Altura remanescente a ser preenchida.

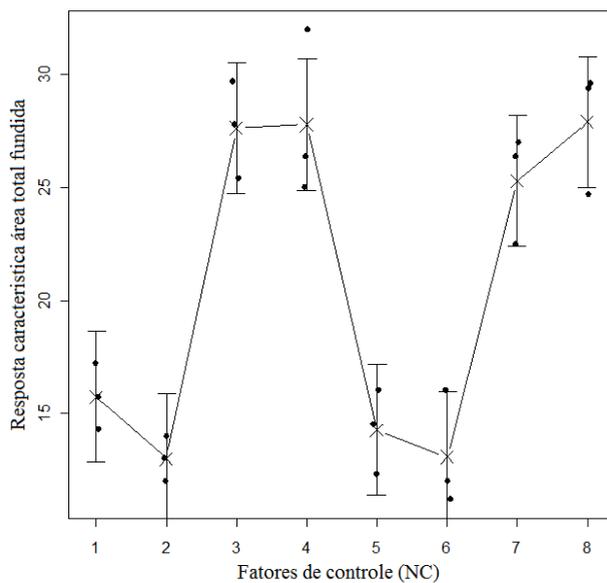


Figura A.4 – Intervalo de confiança, Área total fundida.

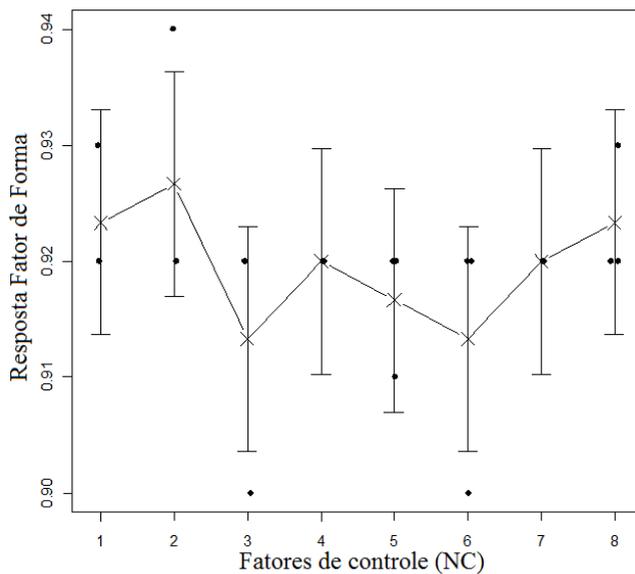
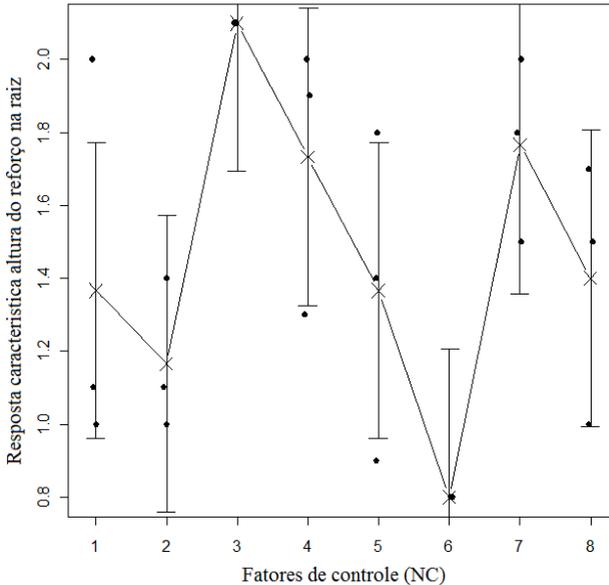


Figura A.5 – Intervalo de confiança, Fator de forma.**Figura A.6 – Intervalo de confiança, Reforço da raiz.**

APÊNDICE B – TABELAS DE ENSAIOS NA SOLDAGEM DE RAIZ EM TUBOS.

As tabelas que seguem contém informações referentes a matriz de fatores empregados nos ensaios com tubos Schedule. São apresentadas nove séries com objetivos distintos que perfazem o conteúdo da seção 4.

Tabela B.1 – Série 1

Tubo 88,9 mm, *Schedule* 80, série 1

Objetivo: Verificar diferença na raiz da solda com o gás Ar a 9,3 e 12 V

Ip	Ib	Gás	Nariz	VS	Va	U	Raiz	
A	A		mm	cm/min	m/min	V		
170	95	Ar	2,0	5	1,0-1,0	12	Sim	1.1
170	95	Ar	2,0	5	1,0-1,0	9,3	Sim	1.2

Tabela B.2 – Série 2Tubo 88,9 mm, *Schedule 80*, série 2

Objetivo: Verificar diferença na raiz com Ar a 9,3 e 12 V, n=2,2 mm.

Nota. Inverteu em relação a série 1, a raiz foi maior com 9,3 V

Ip A	Ib A	Gás	Nariz mm	VS cm/min	Va m/min	U V	Raiz	N
170	95	Ar	2,2	5	1,0-1,0	12	Sim	2.1
170	95	Ar	2,2	5	1,0-1,0	9,3	Sim	2.2

Tabela B.3 – Série 3Tubo 88,9 mm, *Schedule 80*, série 3Objetivo: Verificar diferença na raiz da solda com Ar+5%H₂ a 12 V e Ar a 9,3V, considerando o mesmo comprimento de arco.

Ip A	Ib A	Gás	Nariz mm	VS cm/min	Va m/min	U V	Raiz	N
170	95	Ar+5%H ₂	2,5	5	1,0-1,0	12	Sim	3.1
170	95	Ar	2,5	5	1,0-1,0	9,3	Não	3.2

Tabela B.4 – Série 4Tubo 88,9 mm, *Schedule 80*, série 4Objetivo: Encontrar a VS que confira boa raiz com o gás Ar+5%H₂.

Ip A	Ib A	Im A	Nariz mm	VS cm/min	Va m/min	U V	Raiz	N
170	95	113	2,0	5	1,0-1,0	12	Sim	4.1
170	95	113	2,0	10	1,0-1,0	12	Sim	4.2
170	95	113	2,0	15	1,0-1,0	12	Sim	4.3
170	95	113	2,0	20	1,0-1,0	12	Sim	4.4
170	95	113	2,0	25	1,0-1,0	12	Sim	4.5
170	95	113	2,0	30	1,0-1,0	12	Sim	4.6
170	95	113	2,0	35	1,0-1,0	12	Não	4.7

Tabela B.5 – Série 5Tubo 88,9 mm, *Schedule 80*, série 5

Objetivo: Realizar solda com gás argônio com nariz 4 mm, e verificar a penetração com 9,3 e 12 V.

Ip A	Ib A	Gás	Nariz mm	VS cm/min	Va m/min	U V	Raiz	N
170	95	Ar	4,0	5	1,0-1,0	12	Não	5.1
170	95	Ar	4,0	5	1,0-1,0	9,3	Não	5.2

Tabela B.6 – Série 6Tubo 114 mm, *Schedule 40*, série 6Objetivo: Empregando gás Ar+5%H₂, com a face da raiz em 4 mm, encontrar a energia de soldagem que confira a raiz da solda.

Ip A	Ib A	Im A	Nariz mm	VS cm/min	Va m/min	U V	Raiz	P mm
170	95		4,0	7,5	1,0-1,0	12	Não	3,6
185	95		4,0	7,5	1,0-1,0	12	Sim	
Determinar a raiz da solda elevando Ip (A) para VS=10								
185	95		4,0	10	1,0-1,0	12	Não	3,2
215	95		4,0	10	1,0-1,0	12	Não	3,3
230	95		4,0	10	1,0-1,0	12	Não	3,3
245	95		4,0	10	1,0-1,0	12	Não	3,4
260	95		4,0	10	1,0-1,0	12	Não	3,5
275	95		4,0	10	1,0-1,0	12	Não	3,6
290	95		4,0	10	1,0-1,0	12	S&N	3,8
305	95		4,0	10	1,0-1,0	12	Sim	
Efeito da Va de arame no surgimento da raiz								
315	95		4,0	10	1,0-1,0	12	Sim	
315	95		4,0	10	1,5-1,0	12	Sim	
315	95		4,0	10	1,0-1,5	12	Não	3,6
Efeito da Va de arame no surgimento da raiz								
330	95		4,0	10	1,5-1,5	12	Não	
345	95		4,0	10	1,5-1,5	12	S&N	3,8
360	95		4,0	10	1,5-1,5	12	S	
Efeito da Va de arame no surgimento da raiz								
395	95		4,0	10	2,0-2,0	12	Não	

Tabela B.7 – Série 7Tubo 114 mm, *Schedule 40*, série 7Objetivo: Empregando gás Ar+5%H₂, com a face da raiz em 4 mm, tensão em 12 V, encontrar a energia de soldagem que confira a raiz da solda.

Ip A	Ib A	Im A	Nariz mm	VS cm/min	Va m/min	Eab kJ/cm	Raiz	P mm
290	95	144	4,0	15	1,0-1,0	4,83	Não	
290	110	155	4,0	15	1,0-1,0	5,21	Não	
290	125	166	4,0	15	1,0-1,0	5,59	Não	
290	140	177	4,0	15	1,0-1,0	5,96	Não	
290	155	189	4,0	15	1,0-1,0	6,34	Não	
290	170	200	4,0	15	1,0-1,0	6,72	Não	
290	185	211	4,0	15	1,0-1,0	7,10	S&N	3,8
290	200	223	4,0	15	1,0-1,0	7,48	Sim	

Tabela B.8 – Série 8Tubo 114 mm, *Schedule 40*, série 8Objetivo: Empregando gás Ar+5%H₂, com a face da raiz em 2 mm, tensão em 12 V, encontrar a energia de soldagem que confira a raiz da solda.

Ip A	Ib A	Im A	Nariz mm	VS cm/min	Va m/min	Eab kJ/cm	Raiz	P mm
170	95	114	2,0	30	1,0-1,0	1,91	Não	
190	105	126	2,0	30	1,0-1,0	2,12	Não	
210	115	139	2,0	30	1,0-1,0	2,33	Fraca	
230	125	151	2,0	30	1,0-1,0	2,54	Sim	
230	125	151	2,0	30	1,2-1,2	2,54	Fraca	
250	135	164	2,0	30	1,2-1,2	2,75	Sim	
250	135	164	2,0	30	1,4-1,4	2,75	Fraca	
270	150	180	2,0	30	1,4-1,4	3,02	Sim	
270	150	180	2,0	30	2,0-2,0	3,02	Fraca	
290	160	192	2,0	30	2,0-2,0	3,23	Sim	

Tabela B.9 – Série 9Tubo 114 mm, *Schedule 40*, série 9Objetivo: Empregando gás Ar+5%H₂, com a face da raiz em 2 mm, tensão em 12 v, encontrar a energia de soldagem que confira a raiz da solda.

Ip A	Ib A	Im A	Nariz mm	Vs cm/min	Va m/min	Eab kJ/cm	Raiz	P mm
350	200	237	2,0	40	3,0-3,0		Não	
350	220	252	2,0	40	3,0-3,0		Não	
360	230	262	2,0	40	3,0-3,0		Fraca	
370	240	272	2,0	40	3,0-3,0		Não	