



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE MATERIAIS

**REVESTIMENTO DE LIGAS DE NÍQUEL PELO PROCESSO MIG/MAG COM
TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO**

Antonio Rodolfo Paulino Pessoa

Fortaleza – CE
Outubro de 2009



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE MATERIAIS

**REVESTIMENTO DE LIGAS DE NÍQUEL PELO PROCESSO MIG/MAG COM
TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO**

Dissertação submetida ao Corpo Docente do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
e Ciência de Materiais da Universidade
Federal do Ceará.

Antonio Rodolfo Paulino Pessoa

Orientador: Prof. Dr. Jesualdo Pereira Farias

Fortaleza – CE
Outubro de 2009

P567r Pessoa, Antonio Rodolfo Paulino
Revestimento de ligas de níquel pelo processo MIG/MAG com
transferência por curto-circuito / Antonio Rodolfo Paulino Pessoa, 2009.
145 f. ;il. color. enc.

Orientador: Prof. Dr. Jesualdo Pereira Farias
Área de concentração: Engenharia de Materiais
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de
Tecnologia. Depto. de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Fortaleza,
2009.

1. Ligas de Níquel 2. MIG/MAG 3. Transferência por curto circuito
4. TAGUCHI 5. Geometria da solda I. Farias, Jesualdo Pereira (orient.) II.
Universidade Federal do Ceará –Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos
Materiais

CDD 620.11



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE MATERIAIS

PARECER DA COMISSÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANTÔNIO RODOLFO PAULINO PESSOA

“ REVESTIMENTO DE LIGAS DE NÍQUEL PELO PROCESSO MIG/MAG COM
TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO ”

A Comissão de Dissertação composta pelos professores Jesualdo Pereira Farias, Presidente e Orientador, da Universidade Federal do Ceará; Hélio Cordeiro de Miranda, da Universidade Federal do Ceará e Theophilo Moura Maciel, da Universidade Federal de Campina Grande, considera o candidato:

Aprovado com Louvor

Aprovado

Não Aprovado

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, em 19 de outubro de 2009.

Prof. Dr. Jesualdo Pereira Farias
Presidente e Orientador

Prof. Dr. Hélio Cordeiro de Miranda
Membro

Prof. Theophilo Moura Maciel
Membro

Não há nada repartido de modo mais equitativo no mundo do que a razão, pois todo mundo está convicto de ter suficiente. (René Descartes)

AGRADECIMENTOS

- A Deus, pelo dom da sabedoria.
- À minha família, por sempre me incentivar a prosseguir no caminho da educação.
- À Universidade Federal do Ceará e ao Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, pela minha formação acadêmica e científica no decorrer de todos esses anos na faculdade.
- Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade Federal do Ceará.
- Ao Professor e Orientador Dr. Jesualdo Pereira Farias, pela orientação, dedicação e contribuição para a realização deste trabalho.
- Ao professor Dr. Hélio Cordeiro de Miranda, pelo incentivo, colaboração e questionamentos de modo a engrandecer este trabalho.
- Ao Laboratório de Engenharia de Soldagem (ENGESOLDA), por toda a estrutura para a realização deste projeto, tanto na parte de pesquisa, quanto na parte acadêmica e pela cooperação na minha formação ao longo destes cinco anos como bolsista de graduação e mestrado.
- Ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM), pela utilização do laboratório.
- Ao Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, em especial ao amigo Professor M.Sc. Willys Machado Aguiar, pela utilização do laboratório.
- A todos os bolsistas e amigos do ENGESOLDA, em especial ao Francisco de Assis Filho, ao Francisco Akássio, ao Vitor Torquato pela amizade, pela dedicação e pelas contribuições para a realização deste trabalho.
- Aos colegas de turma, Everton Barbosa Nunes, Airton Patrício, Edvan Cordeiro e Helton Henrique, pela saudável convivência durante o curso.
- A todos não citados que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

- Ao Programa PRH-31 da ANP, pelo apoio e pela concessão da bolsa, de modo a poder me dedicar à conclusão deste trabalho.
- Ao Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello – (CENPES/PETROBRAS) e ao FINEP, pelos suportes técnicos e financeiros na realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo determinar os parâmetros de soldagem que proporcionem condições adequadas para revestimentos com ligas de níquel através do processo MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito indicadas para aplicações no setor de petróleo e gás natural. A primeira etapa consistiu na realização de ensaios exploratórios para determinar os fatores de controle e seus níveis a serem utilizados na etapa posterior denominada de “ensaios definitivos”. Nos ensaios definitivos, para determinar o número de ensaios a serem realizados, optou-se pelo uso do método Taguchi (planejamento robusto de experimentos), de forma a cumprir, com um reduzido número de ensaios, dois objetivos: o primeiro foi obter a influência dos fatores de controle (parâmetros de soldagem) sobre as variáveis respostas (características geométricas dos cordões de solda); e segundo foi determinar as condições ideais para aplicação das ligas de níquel nas soldagens de revestimentos. Foram escolhidos seis fatores de controle com três níveis cada: tensão de referência ($U_r = 20, 22, 24$ V), velocidade soldagem ($V_s = 0,2, 0,3$ e $0,4$ m/min), tipo de tecimento (sem tecimento, duplo oito e tecimento triangular), técnica da tocha (normal, empurrando e puxando), gás de proteção (100% Ar, 70% Ar+30% He e 99,97% Ar+0,03% NO) e o material de adição (AWS ERNiCrMo-3, AWS ERNiCrMo-14 e AWS ERNiCrMo-4). Tais fatores foram divididos pelo método Taguchi em duas matrizes L9, resultando num total de 18 ensaios. Já as variáveis respostas escolhidas foram: a diluição (D), a razão entre o reforço e a largura (R/L) e produto da diluição pela razão R/L ($D \times R/L$). As soldagens foram realizadas na posição plana por simples deposição sobre chapas de aço ASTM 516 Gr60 com dimensões de 200 x 50 x 12,7 mm. Foram mantidas constantes a vazão do gás de proteção em 20 L/min, a velocidade de alimentação em 6,0 m/min e a DBCP em 20 mm. Assim com base nos ensaios definitivos e nos custos de soldagem, foi realizada a soldagem de um revestimento. Os resultados mostraram que os menores níveis da tensão de referência e da velocidade de soldagem proporcionaram as menores diluições. O uso do tecimento proporcionou cordões com baixos valores da razão R/L. O material de adição e o gás de proteção foram capazes de alterar significativamente a geometria do cordão de solda. A técnica da tocha na posição empurrando obteve os menores valores para a diluição e para a razão R/L. E por fim os parâmetros de soldagem selecionados pelo método Taguchi e as características econômicas demonstram ser capazes de obter um revestimento com um bom acabamento superficial e isento de defeitos.

Palavras-Chave: Ligas de Níquel, MIG/MAG, Transferência por Curto-Circuito, Geometria da solda, Taguchi.

ABSTRACT

This work aims to determine the welding process parameters that provide appropriate conditions for weld overlay with nickel alloy through the GMAW process in a short circuiting transfer mode indicated for applications in petroleum and natural gas Industry. Exploratory tests were conducted initially to determine the control factors and their levels to be used in the subsequent stage called the definitive tests. In the definitive tests to determine the number of tests to be accomplished, was chosen by the Taguchi method (Robust design of experiments) and thus with a limited number of tests achieve two objectives: the first was to obtain the influence of the control factors (welding parameters) on quality characteristics (weld bead geometry) and the second was to determine optimal conditions for weld overlay with nickel alloy. Six control factors were employed with three levels each: reference voltage ($U_r = 20, 22, 24$ V), welding speed ($V_s = 0,2, 0,3$ and $0,4$ m/min), arc oscillation (linear, double 8 and triangular weaving) , welding gun orientation (perpendicular, forehand and backhand), shielding gas (100%Ar, 70%Ar+30%He and 99,97% Ar+0,03% NO) and filler metal (AWS ERNiCrMo-3, AWS ERNiCrMo-14 and AWS ERNiCrMo-4). These factors were divided into two L9 orthogonal array resulting in a total of 18 experiments. The employed quality characteristics were: Percent of dilution (D), the ration between reinforcement and bead width (R/L) and product of the dilution for the ratio R/L ($D \times R/L$). The weldings were accomplished using a bead on plate (BOP) technique, flat position, in steel ASTM 516 Gr60 with dimensions of 200 x 50 x 12,7 mm. The other parameters which were kept constant were gas flow rate at 20 L/min, wire feed rate at 6,0 m/min and stick out was at 20 mm. Based in the definitive tests and in the weld costs weld overlay was accomplished. The results showed that the smallest levels of the reference voltage and of the welding speed provided the smallest dilutions. The use of arc oscillation promote weld bead with low values of the ratio R/L. The filler metal and the shielding gas were capable to alter the weld bead geometry significantly. The welding gun orientation forehand obtained the smallest values for the dilution and for the ratio R/L. Finally the welding parameters selected by the Taguchi method and the weld costs demonstrated to be capable for obtaining an overlay with a good superficial aspect and without welding defects.

Keywords: Nickel alloys, GMAW, Short circuiting transfer, Weld bead geometry, Taguchi.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito do teor de Ni e Mo sobre a resistência à corrosão por pites e corrosão sob-tensão (ASM, 1997).....	12
Figura 2 - Corrosão por fadiga na liga UNS N06625 (LUER et al., 2001).....	13
Figura 3 - Representação esquemática do processo MIG/MAG.	25
Figura 4 - Representação esquemática dos equipamentos do processo MIG/MAG.	26
Figura 5 - Tocha robotizada para soldagem MIG/MAG.	27
Figura 6 - Soldagem puxando e empurrando.....	31
Figura 7 - Inclinação da tocha para visualização da solda pelo operador.	31
Figura 8 - Perfil de cordões de solda utilizando diferentes gases (MARQUES, 1991).	33
Figura 9 - Modos de transferência metálica do processo MIG/MAG (MODENESI, 2008)....	35
Figura 10 - Oscilograma de corrente ilustrando os instantes de destacamento da gota.	37
Figura 11 - Representação esquemática das dimensões geométricas das seções transversais dos cordões de solda.	38
Figura 12 - Equipamentos utilizados nas soldagens: (1) robô industrial, (2) fonte eletrônica multiprocesso, (3) Sistema de aquisição, (4) Medidor de Valim.	51
Figura 13 - Posições da tocha.	57
Figura 14 - Tecimento triangular.....	58
Figura 15 - Tecimento em duplo oito.	58
Figura 16 - Extração das amostras dos corpos de prova.....	62
Figura 17 - Ilustração do nível de sobreposição entre os cordões.	64
Figura 18 - Extração dos corpos de prova para medição das variáveis respostas.	64
Figura 19 - Aspecto superficial das soldas em simples deposição sem tecimento.....	65
Figura 20 - Aspecto superficial das soldas em simples deposição com tecimento triangular..	66
Figura 21 - Oscilograma de tensão e corrente: $U_r=26$ V; $V_{alim}= 5$ m/min; $V_s= 0,2$ m/min; ST (Ensaio 13).....	67
Figura 22 - Influência da tensão de referência sobre a largura do cordão de solda e sobre a energia corrigida.	70

Figura 23 - Influência da tensão de referência sobre o reforço do cordão de solda e sobre a energia corrigida.....	71
Figura 24 - Influência da tensão de referência sobre a razão R/L e sobre a energia corrigida.	71
Figura 25 - Influência da tensão de referência sobre a diluição e sobre a energia corrigida....	72
Figura 26 - Influência da tensão de referência sobre a área fundida.	73
Figura 27 - Influência da tensão de referência sobre a área depositada.	73
Figura 28 - Influência da Valim sobre: o reforço, a energia corrigida, o %AA e o Ncc.....	74
Figura 29 - Influência da Valim sobre a penetração do cordão de solda e sobre a energia corrigida.....	75
Figura 30 - Influência da Valim sobre: a razão R/L, a energia corrigida, o %AA e o Ncc.....	75
Figura 31 - Influência da Valim sobre: a diluição, a energia corrigida, o %AA e o Ncc.....	76
Figura 32 - Influência da Vs sobre a largura do cordão de solda e sobre a energia corrigida..	77
Figura 33 - Influência da Vs sobre o reforço do cordão de solda e sobre a energia corrigida.	78
Figura 34 - Influência da Vs sobre a penetração e sobre a energia corrigida.....	78
Figura 35 - Influência da Vs sobre a razão reforço/largura (R/L).	79
Figura 36 - Influência da Vs sobre a diluição.....	79
Figura 37 - Influência da Vs sobre a área depositada.....	80
Figura 38 - Influência da Vs sobre a área fundida.....	81
Figura 39 - Influência do tecimento sobre a largura do cordão de solda.....	81
Figura 40 - Influência do tecimento sobre o reforço do cordão de solda.	82
Figura 41 - Influência do tecimento sobre a penetração do cordão de solda.....	82
Figura 42 - Influência do tecimento sobre a razão reforço/largura (R/L).	83
Figura 43 - Influência do tecimento sobre a diluição.	83
Figura 44 – Geometria dos cordões de solda sem tecimento	84
Figura 45 - Geometria dos cordões de solda com tecimento triangular.	84
Figura 46 - Aspecto superficial do cordão de solda com $U_r=24$ V, T.T=Empurrando, Tecimento=ST e $V_s=0,4$ m/min (Ensaio R8).....	88
Figura 47 - Seção transversal do cordão de solda com $U_r=24$ V, T.T=Empurrando, Tecimento=ST e $V_s=0,4$ m/min (Ensaio R8).....	88

Figura 48 - Aspecto superficial do cordão de solda com $U_r=24$ V, T.T=Puxando, Tecimento=TT e $V_s=0,2$ m/min (Ensaio R9).....	88
Figura 49 - Seção transversal do cordão de solda com $U_r=24$ V, T.T=Puxando, Tecimento=TT e $V_s=0,2$ m/min (Ensaio R9).....	89
Figura 50 - Influência dos fatores de controle sobre a diluição.....	90
Figura 51 - Influência dos fatores de controle sobre a razão R/L.....	91
Figura 52 - Influência dos fatores de controle sobre D_xR/L	91
Figura 53 - Aspecto superficial do cordão de solda com Liga=625, Gás=100%Ar, $V_s=0,2$ m/min e $U_r=20$ V (Ensaio R10).	99
Figura 54 - Seção transversal do cordão de solda com Liga=625, Gás=100%Ar, $V_s=0,2$ m/min e $U_r=20$ V (Ensaio R10).	99
Figura 55- Aspecto superficial do cordão de solda com Liga=C-276, Gás=100%Ar, $V_s=0,4$ m/min e $U_r=22$ V (Ensaio R16).	99
Figura 56 - Seção transversal do cordão de solda com Liga=C-276, Gás=100%Ar, $V_s=0,4$ m/min e $U_r=22$ V (Ensaio R16).	99
Figura 57 - Influência dos fatores de controle sobre a diluição.....	101
Figura 58 - Influência dos fatores de controle sobre a razão R/L.....	101
Figura 59 - Influência dos fatores de controle sobre D_xR/L	102
Figura 60 - Esquema de um revestimento com largura LT produzido por um cordão de solda de largura L, considerando uma sobreposição de 50% ($L/2$).	110
Figura 61 - Custo total, reforço e diluição previstos para duas camadas em função dos ensaios.	112
Figura 62 - Aspecto superficial da camada de revestimento referente ao Ensaio RV01.....	114
Figura 63 - Seção transversal da camada de revestimento referente ao Ensaio RV01.....	114
Figura 64 - Oscilograma de tensão e corrente para primeira camada do revestimento.....	115
Figura 65 - Oscilograma de tensão e corrente para segunda camada do revestimento.	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química nominal das ligas à base de níquel comerciais típicas (% em peso) (AWS, 1996).....	8
Tabela 2 - Sistemas usuais para ligas de níquel.....	9
Tabela 3 - Fases que podem se formar nas ligas de níquel e suas estrutura e fórmula respectivas (ASM, 1997).....	11
Tabela 4 - Composição química (% em peso) da liga UNS N06625 (Special Metals, 2008)..	15
Tabela 5 - Propriedades físicas da liga UNS N06625, medidas à temperatura ambiente (Special Metals, 2008).....	15
Tabela 6 - Propriedades mecânicas da liga UNS N06625, medidas à temperatura ambiente (Special Metals, 2008).....	16
Tabela 7 - Composição química (% em peso) da liga UNS N10276 (Special Metals, 2008)..	17
Tabela 8 - Propriedades físicas da liga UNS N10276, medidas à temperatura ambiente (Special Metals, 2008).....	17
Tabela 9 - Propriedades mecânicas da liga UNS N10276, medidas à temperatura ambiente (Special Metals, 2008).....	18
Tabela 10 - Composição química (% em peso) da liga UNS N06686 (Special Metals, 2008).	19
Tabela 11 - Propriedades mecânicas da liga UNS N06686, medidas à temperatura ambiente (Special Metals, 2008).....	19
Tabela 12 - Propriedades físicas da liga UNS N06686, medidas à temperatura ambiente (Special Metals, 2008).....	20
Tabela 13 - Resistência a corrosão das ligas à base de níquel em soluções ácidas (SHOEMAKER & CRUM, 2003).....	20
Tabela 14 - Especificações da AWS de materiais de adição para MIG/MAG (AWS, 2004)..	34
Tabela 15 - Matriz ortogonal L8.....	46
Tabela 16 - Composição química (% em peso) dos corpos de prova segundo o fabricante. ...	49
Tabela 17 - Composição química (% em peso) do arame eletrodo segundo o fabricante.....	50
Tabela 18 - Parâmetros de soldagem para os ensaios preliminares com $V_s = 0,2$ m/min.....	54
Tabela 19 - Parâmetros de soldagem para os ensaios preliminares com $V_s = 0,4$ m/min.....	55
Tabela 20 - Fatores de controle e seus níveis para a matriz L9-1.	58

Tabela 21 - Fatores de controle e seus níveis para a matriz L9-2.	59
Tabela 22 - Ensaios realizados com a matriz L9-1.....	61
Tabela 23 - Ensaios realizados com a matriz L9-2.....	61
Tabela 24 - Valores das características geométricas, da energia corrigida, do percentual de arco aberto e do número de curtos-circuitos para os ensaios com $V_s= 0,2$ m/min.	68
Tabela 25 - Valores das características geométricas, da energia corrigida, do percentual de arco aberto e do número de curtos-circuitos para os ensaios com $V_s= 0,4$ m/min.	69
Tabela 26 - Nível de significância dos fatores de controle sobre as variáveis respostas.	70
Tabela 27 - Valores das características geométricas para a primeira L9.....	87
Tabela 28 - Nível de significância dos fatores de controle sobre as variáveis respostas.	89
Tabela 29 - Valores das características geométricas das variáveis respostas para os ensaios de confirmação.	92
Tabela 30 - Valores previstos e medidos das variáveis respostas para os ensaios de confirmação.	92
Tabela 31 - Resumo dos parâmetros importantes no método Taguchi para a diluição.	93
Tabela 32 - Resumo dos parâmetros importantes no método Taguchi para a razão R/L.	95
Tabela 33 - Resumo dos parâmetros importantes no método Taguchi para D_xR/L	96
Tabela 34 - Valores das variáveis respostas para a segunda L9.....	98
Tabela 35 - Nível de significância dos fatores de controle sobre as variáveis respostas.	100
Tabela 36 - Valores das variáveis respostas dos ensaios de confirmação.	103
Tabela 37 - Valores previstos e medidos das variáveis respostas para os ensaios de confirmação.	103
Tabela 38 - Resumo dos parâmetros importantes no método Taguchi para a diluição.	104
Tabela 39 - Resumo dos parâmetros importantes no método Taguchi para a razão R/L.	105
Tabela 40 - Resumo dos parâmetros importantes no método Taguchi para o D_xR/L	106
Tabela 41 - Valores obtidos para a TD, TF e ED.	108
Tabela 42 - Custos diretos da soldagem para cada ensaio.....	109
Tabela 43 - Valores previstos para: a diluição (D), o reforço (R), o número de passes (n), o tempo total de soldagem contínua (t_T) e o custo direto total do revestimento (Custo).	111

Tabela 44 - Valores do reforço, do custo e da diluição para os ensaios pré-selecionados para o revestimento. 113

Tabela 45 – Parâmetros e características geométricas da soldagem de revestimento. 113

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABREVIATURAS

AO - Arranjo Ortogonal

AOD - Argon-Oxygen Decarburization

ASM - American Society of Materials

ASTM - American Society for Testing and Materials

AWS - American Welding Society

CA – Corrente Alternada

CCC - Cúbico de Corpo Centrado

CCEP - Corrente Contínua com Polaridade Positiva

CCEN - Corrente Contínua com Polaridade Negativa

CENPES/Petrobras - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello

CFC - Cúbico de Face Centrada

ENGESOLDA - Laboratório de Engenharia de Soldagem

FGD - Flue Gas Desulfurization

GMAW - Gas Metal Arc Welding

MAG - Metal Active Gas

MIG - Metal Inert Gas

PTA - Plasma Transferred Arc

TCP - Topologically Close-Packed Phases

TIG - Tungsten Inert Gas

TTPS - Tratamento Térmico Pós-Soldagem

UFC - Universidade Federal do Ceará

ZAC - Zona Afetada pelo Calor

ZPD - Zona Parcialmente Diluída

SÍMBOLOS

% AA - Percentual de tempo que o arco permanece aberto

Ad - Área depositada do cordão (mm²)

Af - Área fundida do metal de base (mm²)

C - Comprimento do cordão de solda (mm)

D - Diluição percentual do cordão de solda (%)

DBCP - Distância entre o bico de contato e a peça (mm)

DxR/L - O produto da diluição pela razão R/L

Eaa - Energia de arco aberto (KJ/cm)

Ec - Energia Corrigida (KJ/cm)

Ecc - Energia de curto-circuito (KJ/cm)

ED - Eficiência de Deposição (%)

Ief - Corrente Eficaz (A)

Ief_{aa} - Corrente eficaz de arco aberto (A)

Ief_{cc} - Corrente eficaz de curto-circuito (A)

L - Largura do cordão de solda (mm)

la - Comprimento do arame consumido (m)

LT - Largura total de um revestimento (mm)

mf - Massa final do corpo de prova (g)

mi - Massa inicial do corpo de prova (g)

n - Número de passes

Ncc - Número de Curto-Circuitos

P - Penetração do cordão de solda (mm)

R - Reforço do cordão de solda (mm)

R/L - Razão entre o reforço e a largura dos cordões de solda

TD - Taxa de Deposição (Kg/h)

TF - Taxa de Fusão (Kg/h)

T.T - Técnica da Tocha

t_{aa} - Tempo de arco aberto (s)

t_{ta} - Tempo de aquisição (s)

t_s - Tempo de soldagem (s)

t_T - Tempo total de soldagem contínua (s)

U_{ef} - Tensão Eficaz (V)

$U_{ef_{aa}}$ - Tensão eficaz de arco aberto (V)

U_r - Tensão de referência (V)

V_{lim} - Velocidade de alimentação (m/min)

V_s - Velocidade de soldagem (m/min)

α - Nível de significância estatística

γ - Fase Gama

γ' - Fase Gama Linha

γ'' - Fase Gama Duas Linhas

η - Função objetiva ou razão Sinal/Ruído (Função estatística método Taguchi)

ρ_a - Densidade linear do arame (g/m)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	vii
ABREVIATURAS	vii
SÍMBOLOS.....	viii
SUMÁRIO.....	x
INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO	1
1. Introdução e Motivação	1
1.1 Introdução	1
1.2 Motivação	2
OBJETIVOS	4
2. Objetivo Geral e Metas	4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3. Revisão Bibliográfica.....	5
3.1 Ligas de níquel	5
3.2 Propriedades mecânicas	5
3.3 Propriedades físicas	6
3.4 Classificação das ligas à base de níquel.....	6
3.5 Influência dos elementos de liga nas propriedades das ligas a base de níquel	9
3.6 Microestrutura das ligas a base de níquel	10
3.7 Resistência à corrosão das ligas à base de níquel.....	11
3.8 Soldabilidade das ligas de níquel.....	13
3.9 Liga UNS N06625.....	14
3.9.1 Histórico	14
3.9.2 Aplicações e usos em geral.....	14
3.9.3 Desenvolvimento e propriedades.....	15
3.10 Liga UNS N10276.....	16
3.10.1 Histórico	16
3.10.2 Aplicações e usos em geral	16
3.10.3 Desenvolvimento e propriedades	17
3.11 Liga UNS N06686.....	18
3.11.1 Histórico	18
3.11.2 Aplicações e usos em geral	18
3.11.3 Desenvolvimento e propriedades	18
3.12 Revestimentos.....	20
3.12.1 Introdução	20
3.12.2 Revestimentos aplicados por soldagem	21
3.13 Processo de soldagem MIG/MAG	24
3.13.1 Equipamentos utilizados no Processo MIG/MAG	26

3.13.2	Variáveis do processo MIG/MAG	28
3.13.3	Consumíveis do Processo MIG/MAG	32
3.13.4	Transferência Metálica.....	34
3.13.5	A corrente pulsada no MIG/MAG	37
3.14	Características operacionais	38
3.14.1	Características geométricas.....	38
3.14.2	Características econômicas	39
3.14.3	Custos diretos de soldagem.....	40
3.15	Método Taguchi / Projeto Robusto	42
3.15.1	Desenvolvimento do Projeto Robusto.....	42
3.15.2	Projeto dos parâmetros.....	43
3.15.3	Razão Sinal/Ruído	43
3.15.4	Arranjo ortogonal.....	46
3.15.5	Experimentação e análise.....	47
MATERIAIS E MÉTODOS		49
4.	Materiais e Métodos	49
4.1	Materiais de consumo.....	49
4.1.1	Corpos de prova.....	49
4.1.2	Arame eletrodo	49
4.1.3	Gás de proteção	50
4.2	Equipamentos e acessórios.....	50
4.2.1	Equipamentos empregados nas soldagens	50
4.2.2	Equipamentos para preparação metalográfica	51
4.3	Metodologia	51
4.3.1	Etapa 1 - Ensaios preliminares	52
4.3.2	Etapa 2 - Ensaios definitivos	56
4.3.3	Etapa 3 - Soldagem de revestimento.....	63
ENSAIOS PRELIMINARES		65
5.	Etapa 1 - Ensaios preliminares.....	65
5.1	Aspecto superficial.....	65
5.2	Características geométricas	67
5.3	Análise de variância no fatorial completo	69
5.3.1	Influência da tensão de referência (Ur).....	70
5.3.2	Influência da velocidade de alimentação (Valim)	74
5.3.3	Influência da velocidade de soldagem (Vs).....	77
5.3.4	Influência do tecimento	81
5.4	Considerações finais	85
RESULTADOS E DISCUSSÕES		86
6.	Etapa 2 – Ensaios definitivos	86
6.1	Aplicação do método Taguchi.....	86
6.2	Matriz ortogonal L9-1	86
6.2.1	Características geométricas dos cordões.....	87
6.2.2	Aspecto superficial	88
6.2.3	Análise de variância no método Taguchi.....	89
6.2.4	Previsão da combinação ótima	89
6.2.5	Testes de confirmação	92
6.2.6	Análise do critério de qualidade diluição (D).....	93
6.2.7	Análise do critério de qualidade R/L	94
6.2.8	Análise do critério de qualidade DxR/L	96

6.3	Matriz ortogonal L9-2	97
6.3.1	Características geométricas dos cordões.....	98
6.3.2	Aspecto superficial	98
6.3.3	Análise de variância no método Taguchi.....	100
6.3.4	Previsão da combinação ótima	100
6.3.5	Testes de confirmação	103
6.3.6	Análise do critério de qualidade diluição (D).....	103
6.3.7	Análise do critério de qualidade R/L	105
6.3.8	Análise do critério de qualidade DxR/L	106
6.4	Custos de soldagem	107
6.5	Etapa 3 - Soldagem de revestimento	113
ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS		116
7.	Análise geral dos resultados	116
CONCLUSÕES		117
8.	Conclusões	117
Sugestões para trabalhos futuros		118
9.	Sugestões	118
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		119
10.	Referências bibliográficas	119
APÊNDICE I		123
Determinação do intervalo admissível para os critérios de qualidade.		123

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO

1. Introdução e Motivação

1.1 Introdução

A indústria do petróleo e gás natural no Brasil vem buscando constantemente alternativas no sentido de reduzir os custos ao minimizar os desgastes causados pela corrosão em suas unidades de refino e processamento de petróleo. Os equipamentos que compõem estas unidades (fornos, reatores, incineradores, torres de destilação e tubulações), operam sob severas condições de serviço (alta pressão, elevadas temperaturas e meio corrosivo), contudo, faz-se necessário o uso de pressões e temperaturas cada vez mais elevadas no processo de refino, fato que se deve não só a natureza mais pesada (cadeias mais longas de hidrocarbonetos) da matéria-prima, mas também para aumentar a produtividade durante as conversões.

Devido a estes fatores, os materiais utilizados na fabricação e reparo destes equipamentos devem possuir, dentre outras características, excelentes propriedades mecânicas combinadas com uma boa resistência à corrosão em especial para elevadas temperaturas. Apesar da existência de uma grande variedade de materiais que atendem a estes requisitos, como os aços inoxidáveis austeníticos, os aços inoxidáveis ferríticos, os aços inoxidáveis martensíticos, os aços inoxidáveis duplex e os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação, as ligas à base de níquel se destacam por apresentarem excelente resistência mecânica, à corrosão, ao desgaste e às altas temperaturas ou, mesmo em alguns casos possuem uma combinação de todos estes fatores.

Entretanto, devido ao elevado custo de fabricação de equipamentos ou componentes maciços constituídos por estas ligas, uma alternativa viável é a aplicação de revestimentos por soldagem, na qual se deposita uma camada do material mais nobre (ligas de níquel) sobre um substrato menos nobre (aços C-Mn e aços baixa liga). A aplicação destes revestimentos em equipamentos industriais pode ser feita na forma de “clad”, “lining” e “overlay”. Esta última é realizada através da deposição de uma camada de material com características desejáveis (resistência à corrosão, resistência ao desgaste, etc.) sobre um substrato. Dentre os vários processos de soldagem utilizados para a aplicação de revestimentos destacam-se: MIG/MAG,

arame tubular, arco submerso com fita, o TIG (com alimentação de arame frio ou quente) e o plasma por arco transferido (PTA).

O processo MIG/MAG é largamente utilizado na fabricação de componentes revestidos em função da boa produtividade, flexibilidade e custo relativamente baixo. Já a qualidade das soldas realizadas com este processo é muito dependente do controle adequado da transferência metálica. Independentemente do tipo de transferência metálica (curto-circuito, globular ou goticular) escolhida para operar com o processo, é importante que se estabeleçam no procedimento faixas operacionais estáveis de soldagem, ou seja, condições que proporcionam um arco rígido, com pouca oscilação, que apresentem reprodutibilidade dos sinais de tensão e corrente e, por consequência, que resultem em cordões uniformes e sem descontinuidades.

1.2 Motivação

Em âmbito nacional, o esgotamento de jazidas de petróleo leve e a descoberta de grandes jazidas com petróleo pesado somada à atratividade econômica da produção de poços com petróleo de baixa qualidade fizeram com que as unidades de refino iniciassem o processamento de petróleos pesados com alto índice de acidez. Este fato fez com que as unidades de refino e processamento de petróleo da PETROBRAS apresentassem problemas de corrosão, uma vez que estas unidades não foram inicialmente projetadas para processar petróleos pesados. As causas da corrosão são associadas principalmente ao contato dos materiais com substâncias extremamente corrosivas, elevadas temperatura de operação e problemas metalúrgicos.

Estes fatores têm ocasionado um desgaste prematuro dos equipamentos destas unidades, acarretando em paradas não programadas (inesperadas) para realização de reparos. Os custos associados com a parada de uma unidade de processamento são extremamente elevados, além de ocasionar atrasos no fornecimento de seus produtos.

Então como forma de solucionar os problemas de adequação dos equipamentos e da PETROBRAS ao petróleo mais agressivo, estudos preliminares do Centro de Pesquisa da Petrobrás – CENPES/PETROBRAS sugerem o uso das ligas de níquel para adequar ou substituir componentes metálicos que compõem os equipamentos das unidades de produção e refino de petróleo.

Contudo faz-se necessário um estudo sistemático, para uma aplicação apropriada destas ligas como revestimentos metálicos de elevada resistência à corrosão e à oxidação. Neste contexto, este trabalho tem o intuito de realizar um estudo exploratório dos parâmetros

adequados para soldagens de revestimento com ligas de níquel utilizando o processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito. Vale ressaltar que este trabalho faz parte de um conjunto de projetos do CENPES/PETROBRAS em parceria com o Laboratório de Engenharia de Soldagem da Universidade Federal do Ceará (ENGESOLDA), direcionados para avaliação e seleção de materiais para o setor de petróleo e gás natural.

CAPÍTULO II

OBJETIVOS

2. Objetivo Geral e Metas

O objetivo geral deste trabalho é avaliar os efeitos das variáveis de soldagem sobre as características geométricas e econômicas de revestimentos com ligas à base de níquel sobre aços C-Mn para aplicação na indústria do petróleo e gás natural.

Espera-se ao final deste trabalho, alcançar as seguintes metas:

- Determinação de parâmetros operacionais adequados para soldagem com o processo MIG/MAG operando em modo de tensão constante e transferência metálica por curto-circuito, visando uma correta deposição de revestimentos com ligas de níquel sobre um substrato de aço C-Mn.
- Obtenção de características geométricas e econômicas adequadas para recobrimento de aços C-Mn com as ligas UNS N06625 (Inconel 625), UNS N10276 (Hastelloy C-276) e UNS N06686 (Inconel 686) através do processo MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito.

CAPÍTULO III

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3. Revisão Bibliográfica

3.1 Ligas de níquel

As ligas à base de níquel constituem uma classe especial de materiais de engenharia, que se destacam dentre as demais por possuir excelente resistência mecânica, excelentes características de resistência à corrosão em uma infinidade de meios agressivos e elevada resistência ao desgaste, especialmente em condições de elevada temperatura (ASM, 1993a).

Estas ligas foram desenvolvidas por volta de 1930 nos Estados Unidos, para aplicações aeronáuticas, em propulsores a jato, os quais operam em elevada temperatura e necessitam de resistência mecânica suficiente para resistirem aos esforços. Desde então, as ligas de níquel passaram a encontrar novas aplicações em altas temperaturas, como em motores de foguetes e veículos espaciais em geral, reatores nucleares, submarinos, usinas termoelétricas, equipamento petroquímicos, dentre outros (SIMS & HAGEL, 1987).

3.2 Propriedades mecânicas

A razão primordial para a existência das ligas à base de níquel com diferentes composições químicas é a sua excelente resistência mecânica num amplo intervalo de temperaturas. A estrutura cristalina compacta cúbica de face centrada (CFC) da matriz austenítica das ligas à base de níquel, como já foi comprovado, apresenta grande capacidade de manter resistência à tração, à ruptura e boas propriedades de fluência em temperaturas homólogas muito mais altas do que as ligas de matriz cúbica de corpo centrado (CCC) por causa de vários fatores, incluindo o excelente módulo de elasticidade e a alta difusividade que os elementos secundários possuem nesse tipo de matriz. É de grande importância a grande solubilidade de muitos elementos de liga na matriz austenítica e a capacidade de controle da precipitação de fases intermetálicas como a gama linha, que conferem alta resistência mecânica. O endurecimento também pode ser aumentado pela formação de carbeto e também pela dissolução de alguns elementos na matriz (endurecimento por solução sólida). Essa capacidade de endurecimento dessas ligas austeníticas de níquel, de cobalto e de ferro as tornam adequadas para aplicações em turbinas de jato e motores de foguetes, que exigem alta resistência mecânica em média e alta temperatura (SIMS & HAGEL, 1987).

Entretanto, não apenas a resistência mecânica e a dureza são importantes nestes tipos de aplicações. A ductilidade nas condições de serviço também é importante, e a maioria das ligas à base de níquel apresenta boa ductilidade, boa resistência ao impacto, à fadiga de alto e de baixo ciclo e à fadiga térmica (SIMS & HAGEL, 1987).

3.3 Propriedades físicas

O níquel puro possui densidade de $8,9 \text{ g/cm}^3$, ponto de fusão $1455 \text{ }^\circ\text{C}$, estrutura cristalina CFC (cúbica de face centrada). A densidade da maioria das ligas à base de níquel fica entre $7,79$ e $9,32 \text{ g/cm}^3$. Por exemplo, a densidade da Inconel 100 (contém cerca de 60 % de níquel) é de $7,79 \text{ g/cm}^3$, devido aos elevados teores de alumínio e de titânio, ao passo que as ligas à base de níquel com altos teores de tungstênio e tântalo chegam a densidades da ordem de $9,07 \text{ g/cm}^3$. A densidade é uma propriedade importante para as ligas à base de níquel, uma vez que a redução da densidade do componente de turbina de jato leva a um aumento das tensões centrífugas, reduzindo a vida útil do componente (SIMS & HAGEL, 1987).

A condutividade térmica do níquel puro é da ordem de $0,089 \text{ (W/mm}^2\text{)/(}^\circ\text{C/mm)}$, portanto superior à do ferro puro (CCC: cúbico de corpo centrado), que atinge somente $0,072 \text{ (W/mm}^2\text{)/(}^\circ\text{C/mm)}$. Porém a condutividade térmica das ligas à base de níquel é muito inferior, da ordem de 10 % desse valor, devido à adição de muitos elementos de liga em elevados teores. O ideal seria obter ligas à base de níquel com maior condutividade térmica, já que isso seria importante para dissipar calor e assim minimizar os gradientes de temperatura, reduzindo então as tensões térmicas e assim a tendência de ocorrer falha por fadiga térmica (SIMS & HAGEL, 1987).

A expansão térmica nas ligas à base de níquel é menor do que nas ligas ferrosas austeníticas e isso é importante do ponto de vista da aplicação em turbinas de jatos, já que esses componentes são projetados com estreitas tolerâncias dimensionais para operar bem em serviço, além de um baixo coeficiente de expansão térmica contribuir para minimizar as tensões térmicas, minimizando assim a ocorrência de empenamento e fadiga térmica (SIMS & HAGEL, 1987).

3.4 Classificação das ligas à base de níquel

Para melhorar as propriedades mecânicas em altas temperaturas, os engenheiros de materiais escolhem vários tipos de mecanismos de aumento de resistência como o endurecimento por solução sólida, endurecimento por precipitação, endurecimento por

dispersão de óxido e/ou endurecimento por carbonetos (AGARWAL & BRILL, 2000a). Dessa forma, de acordo com as características de fabricação das ligas, podem-se classificar as superligas de níquel conforme a descrição a seguir (AWS, 1996):

- **Endurecidas por solução sólida:** adições de alumínio, cobalto, cobre, cromo, ferro, molibdênio, titânio, tungstênio e vanádio contribuem para o aumento de resistência da matriz γ através de solução sólida. Essas ligas geralmente não apresentam maiores problemas de soldabilidade, porém dependendo da liga e forma de resfriamento, pode-se levar à precipitação de compostos nos contornos de grão e na matriz, que em alguns casos são prejudiciais.
- **Endurecidas por precipitação:** são reforçadas por um controle de temperatura, que resulta na precipitação de uma segunda fase conhecida como γ' , cada liga possui um ciclo térmico ótimo para promover o máximo de resistência. Algumas ligas fundidas já apresentam essa fase após a solidificação.
- **Ligas fundidas:** projetadas especificamente para o processo de fundição, podem apresentar ambos os mecanismos de endurecimento, por solução sólida e por precipitação. Porém como geralmente possui significativa quantidade de silício, para melhorar a fluidez do metal fundido, apresentam problemas de soldabilidade e normalmente não são soldadas por processo com arco elétrico.
- **Endurecidas por dispersão de óxido:** podem ser enrijecidas a níveis elevados através da dispersão de partículas de finos óxidos refratários (ThO_2) pela matriz. Isto é feito pelas técnicas de metalurgia do pó durante a fabricação das ligas. A soldagem por fusão dessas ligas é evitada, sob pena de enfraquecer o metal de solda pela aglomeração das partículas de óxido.

Essa classificação e as ligas que as compõe, com suas respectivas composições químicas são mostradas na Tabela 1 (AWS, 1996).

Tabela 1 - Composição química nominal das ligas à base de níquel comerciais típicas (% em peso) (AWS, 1996).

Ligas ^a	Nº UNS	Composição, peso %														
		Ni ^b	C	Cr	Mo	Fe	Co	Cu	Al	Ti	Nb ^c	Mn	Si	W	B	Outros
Níquel puro comercial																
200	N02200	99,5	0,08	-	-	0,2	-	0,1	-	-	-	0,2	0,2	-	-	-
201	N02201	99,5	0,01	-	-	0,2	-	0,1	-	-	-	0,2	0,2	-	-	-
Ligas endurecidas por solução sólidas																
400	N04400	66,5	0,2	-	-	1,2	-	31,5	-	-	-	1	0,2	-	-	-
X	N06002	47	0,10	22	9	18	1,5	-	-	-	-	1	1	0,6	-	-
NICR80	N06003	76	0,1	20	-	1	-	-	-	-	-	2	1	-	-	-
NICR60	N06004	57	0,1	16	-	Bal.	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-
IN102	N06102	68	0,06	15	3	7	-	-	0,4	0,6	3	-	-	3	0,005	0,03Zr, 0,02Mg
600	N06600	76	0,08	15,5	-	8	-	0,2	-	-	-	0,5	0,5	-	-	-
617	N06617	52	0,07	22	9	1,5	12,5	-	1,2	0,3	-	0,5	0,5	-	-	-
625	N06625	61	0,05	21,5	9	2,5	-	-	0,2	0,2	3,6	0,2	0,2	-	-	-
686	N06686	58	0,005	20,5	16,3	1,5	-	-	-	-	-	-	-	3,8	-	-
690	N06690	60	0,02	30	-	9	-	-	-	-	-	0,5 ^d	0,5 ^d	-	-	-
825	N08825	42	0,03	21,5	3	30	-	2,25	0,1	0,9	-	0,5	0,25	-	-	-
C-276	N10276	57	0,01 ^d	15,5	16	5	2,5 ^d	-	-	0,7 ^d	-	1 ^d	0,08 ^d	4	-	0,35V ^d
C-22	N06022	56	0,010 ^d	22	13	3	2,5 ^d	-	-	-	-	0,5 ^d	0,08 ^d	3	-	0,35V ^d
G-30	N06030	43	0,03 ^d	30	5,5	15	5 ^d	2	-	-	1,5 ^d	1,5 ^d	1 ^d	2,5	-	-
Ligas endurecidas por precipitação																
Waspalloy	N07001	58	0,08	19,5	4	-	13,5	-	1,3	3	-	-	-	-	0,006	0,06Zr
R-41	N07041	55	0,10	19	10	1	10	-	1,5	3	-	0,05	0,1	-	0,005	-
718	N07718	52,5	0,04	19	3	18,5	-	-	0,5	0,9	5,1	0,2	0,2	-	-	-
706	N09706	41,5	0,03	16	-	40	-	-	0,2	1,8	2,9	0,2	0,2	-	-	-
901	N09901	42,5	0,05	12,5	-	36	6	-	0,2	2,8	-	0,1	0,1	-	0,015	-
Ligas endurecidas por dispersão de óxidos																
TD Nickel	N03260	98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2ThO ₂
TD NICR	N07754	78	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2ThO ₂
Ligas fundidas																
HW	N08001	60	0,5	12	-	25	-	-	-	-	-	2,0	2,5	-	-	-
HX	N06006	66	0,5	17	-	15	-	-	-	-	-	2,0	2,5	-	-	-
CY-40	N06040	72	0,4 ^d	16	-	11 ^d	-	-	-	-	-	1,5	3,0	-	-	-
CZ-100	N02100	95	1,0 ^d	-	-	3 ^d	-	1,25 ^d	-	-	-	1,5	2,0	-	-	-
M-35-1	N24135	68	0,35 ^d	-	-	3,5 ^d	-	30	-	-	-	1,5	1,25	-	-	-

a. Algumas dessas ligas possuem nomes registrados, podendo possuir similares com outras designações.

b. Incluída pequena quantidade de cobalto, se não for especificado.

c. Incluído tântalo (Nb+Ta)

d. Valor Máximo

Outra forma usual de classificação das superligas de níquel é quanto aos principais elementos que estão presentes, juntamente com as propriedades e as aplicações específicas, essas ligas são divididas segundo a Tabela 2 (AGARWAL & KLOEWER, 2000b).

Tabela 2 - Sistemas usuais para ligas de níquel.

Sistema da liga	Algumas das principais ligas do sistema
Ni	Níquel puro comercial, ligas 200/201
Ni-Cu	400, K-500
Ni-Mo	B, B-2, B-3, B-4, B-10
Ni-Si	Ligas Ni-Si para fundição, liga SX, Lewmet, D-205
Ni-Fe	Invar
Ni-Cr-Fe	600, 601, 800, 800H, 800HT, 690
Ni-Cr-Fe-Mo-Cu	825, G, G-3, G-30
Ni-Cr-Mo	625, C-276, C-4, 22, 686, C-2000, Mat 21, 59
Ligas de alta temperatura	602CA, 45TM, 230, 625, X, 160, 214, 718, 617, 690, séries Nimonic e Udimet

3.5 Influência dos elementos de liga nas propriedades das ligas a base de níquel

O níquel puro apresenta elevada solubilidade de elementos de liga, devido à estrutura cúbica de face centrada (CFC). Isso faz com que vários elementos de liga possam ser adicionados ao metal puro, variando seu comportamento quanto a propriedades mecânicas e de resistência à corrosão, de acordo com a quantidade de cada elemento de liga acrescentado. Os principais elementos de liga comumente adicionados e seus respectivos efeitos são:

- **Alumínio:** É solúvel no níquel em altas temperaturas e o resfriamento rápido mantém a solução sólida supersaturada à temperatura ambiente. O aquecimento posterior em temperaturas mais baixas permite a precipitação controlada da fase γ' (Ni_3Al). Esse efeito de endurecimento por precipitação ocorre quando o teor de alumínio é de 5 a 12 %. Então com precipitação da fase γ' , há um aumento da resistência mecânica e favorecimento da manutenção dessa elevada resistência mesmo em altas temperaturas. Além disso, o alumínio favorece ainda a resistência à corrosão, pela formação de óxidos de Al_2O_3 (TANCRET et al., 2003);
- **Carbono:** Precipita nos contornos de grão sob a forma de carbonetos e limita o deslizamento, favorecendo um aumento de resistência, no entanto deve ser mantido em teores baixo para evitar a formação de filmes nos contornos de grão, que são prejudiciais na resistência em temperaturas elevadas. O boro tem efeito similar (TANCRET et al., 2003);

- **Cromo:** Aumenta a resistência à corrosão, porém também melhora as propriedades mecânicas da matriz pelo endurecimento por solução sólida. Teores inferiores a 20 % normalmente não contribuem efetivamente para o aumento da resistência à corrosão das superligas de níquel em altas temperaturas. Somente acima deste teor a camada passivante de Cr_2O_3 adquire a espessura, a aderência, a densidade e a consistência necessárias para impedir o avanço dos átomos de oxigênio em difusão (TANCRET et al., 2003);
- **Ferro:** Aumenta a solubilidade do Carbono no Níquel, melhorando assim a resistência a altas temperaturas. É utilizado também para reduzir custos, visto que ferro-cromo é uma fonte mais acessível de cromo (TANCRET et al., 2003);
- **Manganês:** Possui afinidade com o enxofre, sendo um importante controlador dos efeitos nocivos da segregação de compostos sulfurados (RAMIREZ & LIPPOLD, 2004);
- **Molibdênio:** Aumenta a resistência às atmosferas ácidas não oxidantes, à corrosão localizada e a resistência à alta temperatura (ASM, 1993b).
- **Nióbio:** Controla a segregação durante as reações finais de solidificação. Forma a fase γ'' , forma alguns tipos de carbonetos e promove mudanças nos contornos de grão. (AWS, 1996; DUPONT et al., 2003; RAMIREZ & LIPPOLD, 2004);
- **Silício:** Nas ligas comerciais é mantido em teores abaixo de 0,4%, por problemas de soldabilidade, e quando presente tem efeito desoxidante (TANCRET et al., 2003).
- **Titânio:** Efeito similar ao alumínio na formação de precipitados. Quando estes dois elementos estão presentes, é necessário um ajuste em suas composições para melhorar a interface γ/γ' (TANCRET et al., 2003). Também está presente nos metais de adição para se combinar com nitrogênio e evitar formação de porosidade (AWS, 1996).
- **Tungstênio:** Induz aumento de resistência por solução sólida na matriz γ e nos precipitados γ' (TANCRET et al., 2003).

3.6 Microestrutura das ligas a base de níquel

Além da matriz de níquel (fase γ), quando os compostos tornam-se insolúveis em função de algum ciclo térmico ou excesso na fração dos elementos químicos, diversas fases novas podem precipitar. A fase γ' , com a mesma estrutura da matriz e bastante coerente, é a principal fase necessária para o aumento de resistência das ligas modernas, é gerada a partir de alumínio e titânio. Nas ligas que contém nióbio, forma-se outra fase, com estrutura

tetragonal de corpo centrado, conhecida como γ'' , que também é responsável pelo endurecimento por precipitação. É comum a precipitação de diversos tipos de carbonetos e boretos, com diversas composições possíveis. Esses carbonetos podem precipitar tanto no contorno de grão, como internamente à matriz, agindo benéficamente ou maleficamente para as propriedades mecânicas. Nitretos também podem ser encontrados, devido a funções metalúrgicas de alguns elementos químicos. Existem fases que são normalmente indesejadas do ponto de vista metalúrgico, pois agem como concentradores de tensão, devido a serem bastante duras e possuírem formatos de placas finas ou agulhas. Incluídas neste grupo estão as fases delta (δ), fase heta (η) e as de arranjo topologicamente compacto, conhecidas como fases TCP (“Topologically Close-Packed Phases”). As principais fases TCP encontradas nas ligas de níquel são: a fase sigma (σ), a fase mu (μ) e a fase Laves. Estas fases indesejáveis são formadas dependendo da liga e de ciclos térmicos específicos, onde a Tabela 3 mostra um resumo das estruturas e elementos químicos que formam cada uma das fases citadas.

Tabela 3 - Fases que podem se formar nas ligas de níquel e suas estrutura e fórmula respectivas (ASM, 1997).

Fase	Estrutura	Fórmula
γ'	CFC	$Ni_3(Al, Ti)$
γ''	TCC	Ni_3Nb
MC	Cúbica	(Ti, Ta, Nb, Hf, Th ou Zr) C
M_6C	CFC	$Fe_3(Mo, W, Nb)_3C$, Fe_4W_2C , Nb_3Co_3C , Ta_3Co_3C
M_7C_3	Hexagonal	Cr_7C_3
$M_{23}C_6$	CFC	$(Cr, Fe, W, Mo)_{23}C_6$
M_3B_2	Tetragonal	(Nb, Mo, Ti, Cr, Ni, Fe, Ta, V) $_3B_2$
MN	Cúbica	(Ti, Nb, Zr)N
η	HC	Ni_3Ti
δ	Ortorrômbica	Ni_3Nb
μ	Romboédrica	$(Fe, Co)_7(Mo, W)_6$
Laves	Hexagonal	$Fe_2(Nb, Ti, Mo)$, $Co_2(Ti, Ta)$
σ	Tetragonal	FeCr, FeCrMo, CrFeMoNi, CrCo, CrNiMo

3.7 Resistência à corrosão das ligas à base de níquel

As ligas de níquel oferecem excelente resistência à corrosão em uma ampla gama de meios corrosivos. Contudo, devido aos inúmeros tipos de corrosão, diferentes fatores podem influenciar na taxa de ataque. Dentre os principais fatores que atuam diretamente no fenômeno da corrosão, o meio corrosivo é sem dúvida o mais importante. Outros fatores como acidez, temperatura, concentração, movimento relativo da superfície do metal, presença

de inibidores ou aceleradores, dentre outros, devem ser considerados. A grande dificuldade na análise dos processos corrosivos é que muitos destes fatores interagem de forma bastante complexa (ASM, 1993a).

Dentre os principais tipos de corrosão às quais estão sujeitas as ligas de níquel tem-se a corrosão por pites, bastante comum em indústrias petroquímicas. Embora os pites possam surgir por várias causas, certos tipos de substâncias químicas, principalmente sais, e em particular cloretos, são reconhecidamente destacados como formadores de pites. A grande problemática em relação à presença de cloretos é que eles são capazes de destruir a camada passivadora formada por óxido de cromo, penetrando para o interior do material e deixando-o exposto. A adição de molibdênio às ligas de níquel contribui para aumentar a resistência a esse tipo de ataque. Na Figura 1 é apresentado o efeito do molibdênio sobre a corrosão por cloretos (ASM, 1993a).

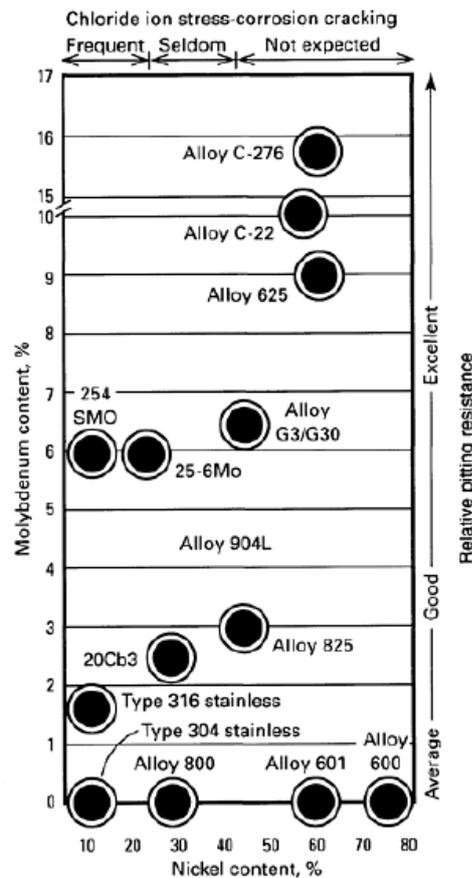


Figura 1 - Efeito do teor de Ni e Mo sobre a resistência à corrosão por pites e corrosão sob-tensão (ASM, 1997).

Quando materiais são submetidos a carregamentos cíclicos na presença de meios corrosivos, os efeitos conjuntos da ação da corrosão e da fadiga são potencializados, resultando em uma intensificação dos danos. O processo de corrosão inicia com a formação de pites que penetram no material e posteriormente ocorre a formação de trincas no interior

dos pites, ocasionando a falha do material (Figura 2). Uma das mais importantes considerações para a seleção de materiais para resistência a corrosão por fadiga é a resistência do material ao meio corrosivo. O alto teor de níquel das ligas de níquel melhora a resistência à corrosão por fadiga. Contudo, é possível a ocorrência deste tipo de corrosão, especialmente em metais de solda devido a segregações de elementos de liga como Mo e Nb (LUER et al., 2001).

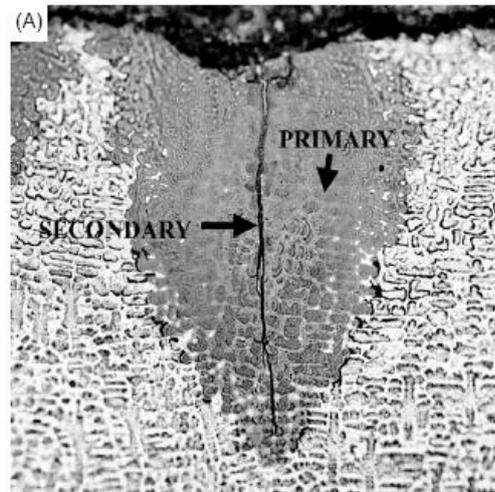


Figura 2 - Corrosão por fadiga na liga UNS N06625 (LUER et al., 2001).

Em se tratando de resistência à corrosão, a literatura apresenta que a liga UNS N06625 resiste a uma grande faixa de ambientes extremamente corrosivos e é especialmente resistente à corrosão por pites e por frestas. A liga UNS N10276 também apresenta elevada resistência à corrosão em uma grande faixa de ambientes extremamente corrosivos. O alto teor de molibdênio torna a liga especialmente resistente à corrosão por pites e por frestas. O baixo teor de carbono reduz a precipitação de carbonetos durante a soldagem, mantendo a resistência em estruturas como soldada (ASM, 1993c).

3.8 Soldabilidade das ligas de níquel

Os procedimentos utilizados nas soldagens das ligas de níquel são semelhantes aos empregados nos aços inoxidáveis, com exceção de que as ligas de níquel possuem uma poça de fusão mais viscosa, requerendo maiores cuidados na deposição do metal de solda em uma junta. Seu coeficiente de dilatação se aproxima do coeficiente de um aço carbono, o que as torna mais favoráveis que dos aços inoxidáveis, minimizando a possibilidade de ocorrência de distorções durante a soldagem (AWS, 1996).

A soldabilidade das ligas de níquel é sensível a elementos residuais como enxofre, chumbo, zircônio, boro, fósforo e bismuto, pois tais elementos são praticamente insolúveis

nas ligas de níquel e podem induzir à formação de reações eutéticas o que pode causar trincas à quente durante a solidificação das soldas. Todas as ligas de níquel comerciais importantes possuem limites na especificação desses elementos. Em certas ligas, o boro e o zircônio são adicionados em pequenas quantidades para melhorar o desempenho em altas temperaturas, mas, neste caso, a soldabilidade fica prejudicada. E o magnésio é adicionado em pequenas quantidades em produtos trabalhados e consumíveis para evitar os efeitos indesejáveis do enxofre na ductilidade (AWS, 1996).

As principais limitações na soldagem das ligas de níquel estão relacionadas ao uso do elevado aporte térmico, pois podem produzir uma excessiva precipitação de carbonetos ou outros fenômenos metalúrgicos danosos que, algumas vezes, podem levar à formação de trincas ou à perda de resistência à corrosão (AWS, 1996).

Estas ligas são soldadas com alta qualidade pelos processos comumente usados, mas nem todos os processos são aplicáveis para todas as ligas, pois as características metalúrgicas, a disponibilidade de metais de adição e de fluxos adequados, podem limitar a escolha do processo. Então a escolha do processo de soldagem deverá ser baseada nos seguintes critérios (AWS, 1996):

- liga a ser soldada;
- espessura do metal base;
- condições de projeto da estrutura (temperatura, pressão, tipo de tensão etc);
- posição de soldagem;
- necessidade de sujeição da junta;
- condições de serviço e de ambiente.

3.9 Liga UNS N06625

3.9.1 Histórico

O desenvolvimento da liga UNS N06625 (Inconel 625) foi iniciado em 1950 com a finalidade de suprir a demanda de materiais de alta resistência para uso em plantas de energia supercrítica, e concluído com a venda comercial da liga em 1962 (EISELSTEIN & TILLACK, 1991).

3.9.2 Aplicações e usos em geral

A liga UNS N06625 é utilizada em várias indústrias (aeroespacial, química, petroquímica, nuclear, naval, dentre outras) devido a sua grande resistência mecânica,

excelente resistência à fadiga, resistência térmica, resistência à oxidação, excelente soldabilidade e brasagem, excelente resistência à corrosão em vários meios e em uma ampla faixa de temperatura e pressão, resistência a cloretos, além de seu uso frequente como material de adição em soldas dissimilares por causa de sua resistência, ductilidade e sua habilidade de tolerar na diluição uma grande quantidade de outros materiais (EISELSTEIN & TILLACK, 1991).

Por estas propriedades, a indústria aeroespacial tem utilizado em aplicações como: sistema de exaustão de turbinas, barras spray, sistemas reversores de segurança, anéis de vedação de turbinas, tubos em linhas hidráulicas, dentre muitas outras. Na indústria petroquímica, tem sido utilizada em queimadores, tubos de processamento, vasos de pressão, colunas de destilação e válvulas. É também encontrada em ambientes marinhos por sua resistência a corrosão em águas salgadas (THOMAS & TAIT, 1994).

3.9.3 Desenvolvimento e propriedades

A liga UNS N06625 faz parte das ligas de níquel que utiliza o mecanismo de aumento de resistência por solução sólida, por meio da adição dos elementos carbono, cromo, molibdênio e nióbio, como mostra a Tabela 4.

Cr e Mo são os maiores contribuintes para resistência mecânica e à corrosão enquanto, a adição de Nb aumenta significativamente a resistência à fluência. Já elementos como Al e Ti aumentam a estabilidade térmica (THOMAS & TAIT, 1994). As tabelas 5 e 6 mostram as propriedades físicas e as propriedades mecânicas respectivamente, medidas à temperatura ambiente.

Tabela 4 - Composição química (% em peso) da liga UNS N06625 (Special Metals, 2008).

Elemento	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb	Al	Ti	Mn	Si	C
% em peso	58,0 min	20,0 a 23,0	8,0 a 10,0	5,0 max	3,15 a 4,15	0,4 max	0,4 max	0,5 max	0,5 max	0,1 max

Tabela 5 - Propriedades físicas da liga UNS N06625, medidas à temperatura ambiente (Special Metals, 2008).

Ponto de fusão (°C)	Densidade (g/cm ³)	Calor Específico (J/kg.K)	Coefficiente de dilatação (µm/m.K)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Resistividade (µΩ.m)
1290 - 1350	8,44	410	12,8	9,8	1,29

Tabela 6 - Propriedades mecânicas da liga UNS N06625, medidas à temperatura ambiente (Special Metals, 2008).

Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento em 50mm (%)	Módulo de Elasticidade (MPa)
930	517	42,5	207

A liga UNS N06625 foi desenvolvida para serviços em temperaturas abaixo de 700 °C e combina uma alta resistência ao envelhecimento com excelentes características de fabricação. Embora tenha sido originalmente projetada para ter sua resistência aumentada por solução sólida, é instável no envelhecimento ou durante o serviço em elevadas temperaturas na faixa de 600 a 800 °C (EISELSTEIN & TILLACK, 1991). Por isso foi observada a precipitação de fases intermetálicas (γ' , laves e δ) e carbonetos (MC , M_6C e $M_{23}C_6$) (MATHEW et al., 2004).

A microestrutura típica da liga UNS N06625 não possui qualquer fase do tipo TCP na condição recozida (OGBORN et al., 1995). Contudo a solda é mais sensível do que o metal de base a mudanças microestruturais uma vez que após a soldagem, podem aparecer fases TCP na microestrutura da solda como resultado de uma condição de solidificação metaestável ou depois de prolongada exposição em elevada temperatura. Estas fases podem afetar negativamente as propriedades de corrosão e mecânicas (OGBORN et al., 1995).

3.10 Liga UNS N10276

3.10.1 Histórico

A liga UNS N10276 (Hastelloy C-276) foi introduzida no mercado na metade dos anos sessenta para superar sérias limitações das ligas anteriores da família C. Esta liga foi obtida a partir da modificação da composição química da liga C pela companhia alemã BASF, que basicamente consistiu em reduzir os teores de carbono e silício nesta liga em mais de dez vezes, resultando em níveis muito baixos destes elementos, em torno de 50 ppm de carbono e 400 ppm de silício. Isto só foi possível devido à invenção de uma nova tecnologia de fundição, conhecido como processo AOD (Argon-Oxygen Decarburization).

3.10.2 Aplicações e usos em geral

As ligas de Ni-Cr-Mo são as ligas de níquel mais versáteis, pois elas contêm molibdênio para proteção contra corrosão sob ambientes redutores e cromo que protege contra corrosão em ambientes oxidantes. A liga UNS N10276 tem baixa taxa de corrosão em ambos

ambientes redutores (10% ácido sulfúrico em ebulição) e ambientes oxidantes (10% ácido nítrico em ebulição). Uma das principais aplicações das ligas de Ni-Cr-Mo está na presença de soluções que contém cloretos, pois sob estas condições, a maioria dos aços inoxidáveis sofreria corrosão por frestas, corrosão por pites e corrosão sob tensão. Porém, as ligas de Ni-Cr-Mo são altamente resistentes, se não imunes aos ataques induzidos por cloretos na maioria das aplicações industriais (Special Metals, 1999).

3.10.3 Desenvolvimento e propriedades

A liga UNS N10276, também foi projetada para ter sua resistência aumentada por meio da presença de elementos de liga em solução sólida na matriz γ como carbono, cromo, molibdênio, ferro e tungstênio, como mostra a Tabela 7. É especialmente adequada ao serviço com oxidantes mais severos, sendo também um dos poucos materiais metálicos que resiste aos hipocloritos como cloro livre. Pode ser empregada com os ácidos sulfúrico, sulfuroso, crômico e nítrico até 80 °C, em quase todas as concentrações, resistindo também à mistura destes ácidos, bem como aos sais fortemente oxidantes como cloreto de ferro e de cobre. A temperatura limite de uso é de 1.100 °C, tanto em atmosferas oxidantes como redutoras. Quando soldada, em geral, não necessita de TTPS (tratamento térmico pós-soldagem) para promover a homogeneização da microestrutura. É resistente à formação de precipitados nos contornos de grão da ZAC, podendo em muitas aplicações, ser utilizada no estado como soldado (Special Metals, 1999).

Tabela 7 - Composição química (% em peso) da liga UNS N10276 (Special Metals, 2008).

Elemento	Ni	Mo	Cr	Fe	W	Co	Mn	V	Si	P	S	C
% em peso	Bal.	15,0 a 17,0	14,5 a 16,5	4,0 a 7,0	3,0 a 4,5	2,5 max.	1,0 max.	0,35 max.	0,08 max.	0,04 max.	0,03 max.	0,01 max.

A Tabela 8 e a Tabela 9 mostra as propriedades físicas e mecânicas medidas à temperatura ambiente para a liga UNS N10276.

Tabela 8 - Propriedades físicas da liga UNS N10276, medidas à temperatura ambiente (Special Metals, 2008).

Ponto de Fusão (°C)	Densidade (g/cm ³)	Calor Específico (J/kg.K)	Coefficiente de dilatação (μm/m.K)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Resistividade (μΩ.m)
1325 – 1370	8,89	425	12,2	9,8	1,30

Tabela 9 - Propriedades mecânicas da liga UNS N10276, medidas à temperatura ambiente (Special Metals, 2008).

Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento em 50 mm(%)	Módulo de Elasticidade (MPa)
930	517	42,5	207

3.11 Liga UNS N06686

3.11.1 Histórico

A liga UNS N06686 (Inconel 686) foi apresentada ao mercado de sistemas “Flue Gas Desulfurization” (FGD) por volta de 1990. É uma liga à base de níquel com 22% cromo, 16% molibdênio e 4% tungstênio e um teor de ferro menor que 1%. A liga 686 é a liga forjada mais altamente ligada (40,7%) disponível para resistir à corrosão (SHOEMAKER & CRUM, 2003).

3.11.2 Aplicações e usos em geral

A liga UNS N06686 é usada nos ambientes mais severos encontrados nos sistemas de FGD inclusive em linhas de descarga, dutos, abafadores, lavadores de gás, reaquecedores de gás de descarga, ventiladores e carcaças de ventiladores. A liga UNS N06686 é usada em componentes utilizados no controle da poluição, nos processamentos químicos, petroquímicos, na indústria de óleo e gás, na fabricação de polpa e de papel, nos ambientes marinhos e indústrias de geração de energia. Aplicações para processamento químico e petroquímico incluem trocadores de calor, vasos de reação, evaporadores e tubulações de transferência (SHOEMAKER & CRUM, 2003).

3.11.3 Desenvolvimento e propriedades

A liga UNS N06686 é uma liga de Ni-Cr-Mo-W constituída de uma única fase, austenítica. Ela foi projetada para ter uma excelente resistência à corrosão em uma ampla faixa de ambientes agressivos. A composição química da liga está na Tabela 10. Os teores elevados de níquel e de molibdênio provêm uma boa resistência à corrosão em meios redutores e o elevado nível de cromo dá resistência a meios oxidantes. O molibdênio e tungstênio também ajudam na resistência a corrosão localizada (pites e corrosão por frestas). O baixo teor de carbono e de outros elementos na composição controla e ajuda a minimizar precipitação nos contornos de grão, mantendo a resistência à corrosão na ZAC de juntas soldadas (SHOEMAKER & CRUM, 2003).

Tabela 10 - Composição química (% em peso) da liga UNS N06686 (Special Metals, 2008).

Elemento	Ni	Cr	Mo	W	Fe	Mn	Ti	Si	P	S	C
% em peso	Bal.	19,0 a 23,0.	15,0 a 17,0	3,0 a 4,4	1,0 max.	0,75 max	0,02 a 0,25	0,08 max	0,04 max.	0,02 max	0,01 max.

Com teores de elementos de liga tão altos, são exigidos controles de processo especiais para prevenir a formação de fases secundárias (por exemplo, mu e sigma). Os lingotes da liga UNS N06686 são submetidos a uma alta temperatura de homogeneização antes de serem laminados a quente. O tratamento de homogeneização em alta temperatura permite a difusão dos elementos de liga para áreas distantes dos locais de segregação que se desenvolvem durante a solidificação do lingote. O estado homogêneo do lingote evita a formação subsequente de fases fragilizantes (SHOEMAKER & CRUM, 2003).

O reduzido teor de ferro nestas composições altamente ligadas também é útil em dois aspectos. Primeiro, reduzindo o ferro de aproximadamente 5% para aproximadamente 1%, permite a adição de cerca de 4% a mais de níquel. Isto pode ter um efeito significativo na estabilidade da liga. E o segundo aspecto é que o ferro e o titânio afetam a resistência à corrosão intergranular da liga, após a sua exposição em temperaturas entre 760°C a 982°C (SHOEMAKER & CRUM, 2003).

Esta liga é frequentemente usada na condição recozida, mas ela pode ser trabalhada a frio para atingir elevados níveis de resistência. A matriz desta liga é uma solução sólida estável e não pode ser endurecida (aumento de resistência) através de tratamento térmico. A Tabela 11 mostra as propriedades mecânicas à temperatura ambiente da liga na forma de vários produtos e na condição recozida. E a Tabela 12 mostra as propriedades físicas desta liga (SHOEMAKER & CRUM, 2003).

Tabela 11 - Propriedades mecânicas da liga UNS N06686, medidas à temperatura ambiente (Special Metals, 2008).

Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento em 50mm(%)	Módulo de Elasticidade (MPa)
758	379	60,0	207

Tabela 12 - Propriedades físicas da liga UNS N06686, medidas à temperatura ambiente (Special Metals, 2008).

Ponto de fusão (°C)	Densidade g/cm ³	Calor Específico (J/kg.K)	Coefficiente de dilatação (μm/m.K)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Resistividade (μΩ.m)
1338 - 1380	8,73	373	11,97	9,8	1,237

A excelente resistência à corrosão é o principal atributo da liga UNS N06686. Sua composição provê resistência à corrosão generalizada, corrosão sob tensão e corrosão localizada (por pites e corrosão por frestas) em uma ampla faixa de ambientes agressivos. Uma característica particularmente desejável desta liga é sua resistência à precipitação intergranular durante soldagem. Assim, componentes fabricados mantêm a resistência à corrosão mesmo nas ZAC's das juntas soldadas. A liga UNS N06686 tem excelente resistência tanto à redução e oxidação de ácidos como também para misturas de soluções ácidas. A Tabela 13 compara a resistência à corrosão geral da liga UNS N06686 com as outras ligas de níquel em soluções ácidas, na qual a taxa de corrosão é dada em mm/ano e para 168 horas de ensaio (SHOEMAKER & CRUM, 2003).

Tabela 13 - Resistência a corrosão das ligas à base de níquel em soluções ácidas (SHOEMAKER & CRUM, 2003).

Liga/Meio	80% H ₂ SO ₄ a 80°C	2% HCl em ebulição	10% H ₂ SO ₄ + 5% HCl a 80°C
UNS N06455	0,80	1,82	1,20
UNS N10276	0,58	1,09	1,01
UNS N06022	1,29	1,40	2,77
UNS N06625	1,32	1,32	2,08
UNS N06059	0,62	0,70	1,29
UNS N06686	0,11	0,15	0,85

3.12 Revestimentos

3.12.1 Introdução

Os revestimentos metálicos foram desenvolvidos no começo da década de 1930 e uma de suas primeiras aplicações foi a utilização de níquel sobre aço carbono. Este composto era usado na construção de tanques de guerra. Outros produtos feitos de aço revestido foram

então utilizados em fornos de destilação, vasos de processamento, ferramentas manuais, equipamentos de armazenamento e outros (MAGALHÃES, 2008).

A maioria dos revestimentos metálicos são compostos de metais como aços inoxidáveis, ligas de níquel e ligas de cobre soldados sobre aços carbono e aços baixa liga. A espessura do revestimento geralmente varia entre 5 e 20% da espessura do substrato. A vantagem do revestimento é promover, a partir de um baixo custo relativo, os benefícios de materiais mais caros, que possuem características de resistência à corrosão, resistência à abrasão e outras (MAGALHÃES, 2008).

Contudo a soldagem de revestimento geralmente é uma soldagem entre materiais dissimilares, exibindo um fenômeno único de fissuração, o qual não é observado em soldas entre materiais similares. No entanto trincas ou desprendimentos ao longo ou próximos à linha de fusão em soldas dissimilares ferrítico-austenítico vêm sendo um problema persistente por mais de 60 anos (MAGALHÃES, 2008).

O processo de manufatura do revestimento pode ser realizado de diversas maneiras. Laminação a quente, soldagem por explosão, aspersão térmica, recobrimento com solda (overlay) e recobrimento com chapa (lining) são métodos de produzir materiais revestidos (MAGALHÃES, 2008).

3.12.2 Revestimentos aplicados por soldagem

Revestimentos aplicados por soldagem consistem na deposição de um material de adição sobre um metal de base (substrato) para dar à superfície algumas propriedades que não são intrínsecas ao metal base. Há vários tipos de revestimentos aplicados por soldagem: *hardfacing* (revestimento duro), *buildup*, *weld cladding* e amanteigamento (ASM, 1993b).

Hardfacing é uma técnica de revestimento, que é aplicada com a finalidade de reduzir o desgaste, a abrasão, o impacto, a erosão, a escoriação ou a cavitação. As ligas para revestimento duro podem ser depositadas por soldagem oxiacetilênica, inúmeros processos de soldagem a arco elétrico, soldagem a laser e por processos de aspersão térmica (ASM, 1993b).

O termo *buildup* (reconstrução) refere-se à adição de metal de solda sobre a superfície do metal de base para a recuperação das dimensões exigidas para o componente. Neste processo, geralmente não são utilizadas ligas para resistir ao desgaste, mas sim para devolver a parte desgastada, dimensões próximas ou iguais às dimensões originais ou ainda fornecer suporte adequado para camadas subsequentes de verdadeiros materiais para revestimento duro (ASM, 1993b).

Weld cladding consiste numa camada relativamente grossa de metal de adição aplicada sobre um aço carbono ou baixa liga (material de base) com a finalidade de obter-se uma superfície resistente à corrosão. Esta técnica de revestimento normalmente é realizada por processos a arco elétrico (ASM, 1993b).

O amanteigamento envolve a deposição de uma ou mais camadas de metal de solda na face da junta ou da superfície a ser soldada. Difere do *buildup*, pois a finalidade principal do amanteigamento é satisfazer alguma consideração de caráter metalúrgico. Esta técnica é usada principalmente quando há uma união entre materiais de base dissimilares (ASM, 1993b).

O *Hardfacing* e o *Weld Cladding* são bastante utilizados nas operações de revestimento por soldagem, por isso serão descritos de forma mais detalhada a seguir:

a) **Hardfacing**

Hardfacing é a aplicação de um material duro e resistente ao desgaste sobre a superfície de um componente por soldagem, por aspersão térmica, ou por um conjunto de processos de soldagem com o intuito de reduzir o desgaste ou a perda de material ocasionada por abrasão, impacto, erosão, escoriação e cavitação (ASM, 1993b).

A hipótese de que a superfície seja modificada por soldagem, por aspersão térmica, ou por processos de soldagem em conjunto excluem o uso de tratamentos térmicos ou processos de modificação da superfície como endurecimento por chama, nitretação ou implantação de íon. A hipótese de que a superfície aplicada tenha o propósito principal de reduzir o desgaste exclui a aplicação de materiais usados principalmente para prevenção ou controle de corrosão e oxidação superficial em alta temperatura. Porém, a corrosão e/ou oxidação superficial em alta temperatura pode(m) ter um efeito fundamental na taxa de desgaste e, conseqüentemente, pode se tornar um fator significativo na seleção de materiais para operações de *hardfacing* (ASM, 1993b).

Existe uma grande variedade de aplicações para controle de desgaste exercido pelo *hardfacing*, que vão desde serviços em que o desgaste abrasivo é muito severo, como em operações de esmagar e pulverizar rochas até aplicações para minimizar o desgaste de metal contra metal, como em válvulas de controle onde o desgaste de alguns milésimos de polegada é intolerável. O *hardfacing* é usado para controlar desgaste abrasivo, como os encontrados em martelos de britadeiras, ferramentas de cavar, parafusos de extrusão, tesouras de corte, partes de equipamento de transporte de terra e partes de britadeira. Também é usado para controlar o desgaste em que há contatos deslizantes de metal contra metal, os quais não são lubrificados

ou existe uma lubrificação insuficiente, como em válvulas de controle, chassis de tratores e pás escavadeiras ou ainda em mancais de grande desempenho. O *hardfacing* também pode ser usado para controlar combinações de desgaste e corrosão, como encontrado em selos de lama, arados, facas nas indústrias de processamento de alimentos, válvulas e bombas que controlam líquidos corrosivos (ASM, 1993b).

A seleção do processo de deposição e da liga a ser depositada depende de vários fatores como as condições de operação, as características do metal de base, a relação custo/benefício do componente a ser revestido, o custo de processamento, etc. Os processos de soldagem utilizados para aplicar os materiais no *hardfacing* vão desde os tradicionais (soldagem oxiacetilênica, eletrodo revestido, MIG/MAG, TIG, arco submerso) aos processos sofisticados e novos (PTA e soldagem a laser). Com relação à liga a ser depositada, existe uma grande variedade de materiais que podem ser utilizados como revestimentos, dentre os mais importantes estão as superligas à base de Níquel e as superligas à base de Cobalto. Os substratos mais comumente utilizados são os aços de baixo ou médio carbono e os aços inoxidáveis (ASM, 1993b).

b) Weld Cladding

O termo *Weld Cladding* normalmente significa a aplicação de uma camada relativamente grossa (≈ 3 mm ou 1/8 in) de metal de solda com a finalidade de obter-se uma superfície resistente à corrosão. *Hardfacing*, como descrito anteriormente produz uma camada superficial menos espessa que no *Weld Cladding* e normalmente é aplicada para restauração dimensional ou resistência ao desgaste. Os materiais de base tipicamente soldados com esta técnica são superfícies internas constituídas por aço carbono e baixa liga em vasos de pressão, digestores de papel, reatores de uréia, trocadores de calor, tanques de contenção em reatores nucleares e hidrocraqueadores (ASM, 1993b).

Os materiais normalmente utilizados para aplicação do revestimento são os aços inoxidáveis ou ligas à base de níquel, embora também sejam usadas algumas vezes ligas à base de cobre. Em alguns casos específicos, utiliza-se um metal de adição contendo prata.

Esta técnica de revestimento normalmente é executada através do processo a arco submerso. Porém, os processos de soldagem arame tubular (autoprotégido ou com proteção gasosa), soldagem a plasma e eletroescória também podem produzir este tipo de revestimento. Os metais de adição disponíveis são: eletrodos com revestimento, bobinas de arame-eletrodo e eletrodos em fitas (ASM, 1993b).

Esta técnica de revestimento é um excelente método para conferir à superfície de um substrato propriedades que não estão disponíveis naquele metal de base ou ainda preservar materiais caros ou de difícil obtenção, pois se utiliza apenas uma camada superficial relativamente fina destes materiais sobre um material de base mais barato ou abundante. Esta técnica tem várias limitações inerentes ou possíveis problemas que devem ser considerados durante o planejamento da aplicação do revestimento (ASM, 1993b).

A posição de soldagem também deve ser considerada ao selecionar o processo e o material da camada, pois certos processos estão limitados ao uso de apenas algumas posições de soldagem, como o caso do arco submerso que só pode ser usado na posição plana. Além disso, quando se emprega um processo com alta taxa de deposição, tem-se uma poça de fusão líquida grande, tornado difícil ou mesmo impossível a soldagem na posição vertical ou sobrecabeça. Algumas ligas exibem uma solidificação eutética que conduz a grandes poças fundidas, as quais solidificam imediatamente apresentando uma consistência pastosa (líquido mais sólido). Tais materiais também são difíceis de soldar em posições diferentes da posição plana (ASM, 1993b).

3.13 Processo de soldagem MIG/MAG

O processo MIG/MAG (Figura 3), também conhecido pela sigla GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), vem sofrendo nas últimas décadas um impressionante desenvolvimento. Isto ocorre, entre outras coisas, devido a sua elevada produtividade e à facilidade de automação, o que, aliado à utilização de periféricos informatizados e à crescente utilização de robôs na indústria contemporânea, impulsionaram ainda mais o desenvolvimento e a aplicação desse processo. Pode-se afirmar ainda que a flexibilidade seja a principal característica do processo MIG/MAG, pois permite soldar aços de baixa liga, aços inoxidáveis e alumínio, em espessuras a partir de 0,5 mm, em todas as posições de soldagem. O processo MIG/MAG é um processo de soldagem a arco voltaico que utiliza um arame consumível alimentado continuamente em direção à poça de fusão, e utiliza, ainda, uma proteção gasosa (MODENESI, 2008).

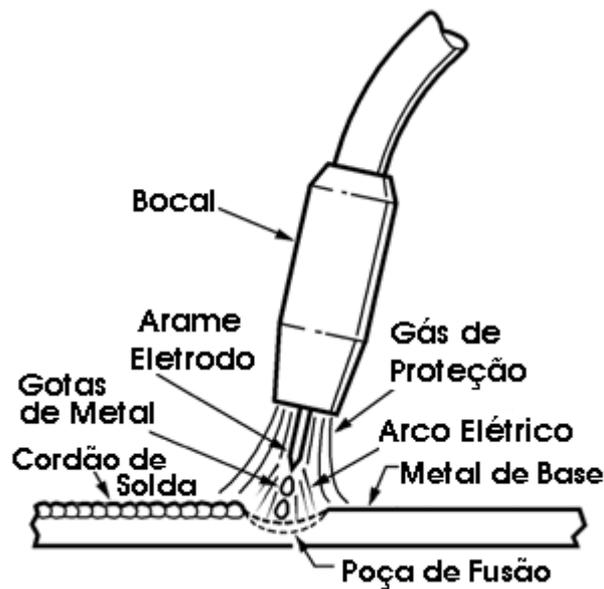


Figura 3 - Representação esquemática do processo MIG/MAG.

Normalmente este processo é realizado em corrente contínua com polaridade positiva (CCEP), o que resulta num arco estável com transferência metálica regular e baixa quantidade relativa de respingos. Recentemente, este processo em corrente alternada tem sido utilizado para a soldagem de chapas finas (PAIVA et al., 2004).

Este processo é capaz de realizar soldagens em todas as posições, automaticamente e de forma semi-automática. Os consumíveis utilizados são basicamente, o arame eletrodo e o gás de proteção. O arame eletrodo empregado, geralmente, apresenta composição química próxima à do metal de base. Uma das principais necessidades deste processo, para garantir a boa qualidade da solda, é de manter o comprimento do arco constante, e para tanto é necessário que sejam estabelecidos parâmetros de soldagem adequados que garanta um equilíbrio entre taxa de fusão e velocidade de alimentação do arame eletrodo. Dentre as vantagens e desvantagens que o processo apresenta destacam-se as seguintes:

Vantagens:

- Processo semi-automático e automático;
- Aplicado para todos os metais e ligas comerciais;
- Grandes faixas de espessuras soldáveis;
- Eletrodo alimentado continuamente;
- Soldagem em todas as posições;
- Elevadas taxas de deposição;
- Diferentes tipos de transferência metálica;
- Elevadas velocidades de soldagem;

- Soldagens de longo comprimento;
- Elevada penetração;
- Pouco trabalho de limpeza após a soldagem;
- Mão-de-obra de fácil treinamento.

Desvantagens:

- Equipamento caro, complexo e pesado;
- Difícil soldagem em ambientes expostos;
- Limitação para uso em locais de difícil acesso;
- Maiores níveis de radiação térmica
- Não apresenta efeito metalúrgico;
- A tocha deve estar sempre muito próxima da junta (entre 10 e 20 mm).

3.13.1 Equipamentos utilizados no Processo MIG/MAG

Os equipamentos necessários para soldagem com processo MIG/MAG são compostos basicamente por uma fonte de energia, um sistema de alimentação de arame eletrodo, uma tocha de soldagem, um sistema de fornecimento de gás e, normalmente, um sistema independente de refrigeração da tocha, ilustrados na Figura 4. Dentre estes equipamentos, a fonte de energia pode ser considerada a mais importante, pois é responsável pelo controle dos principais parâmetros de soldagem.

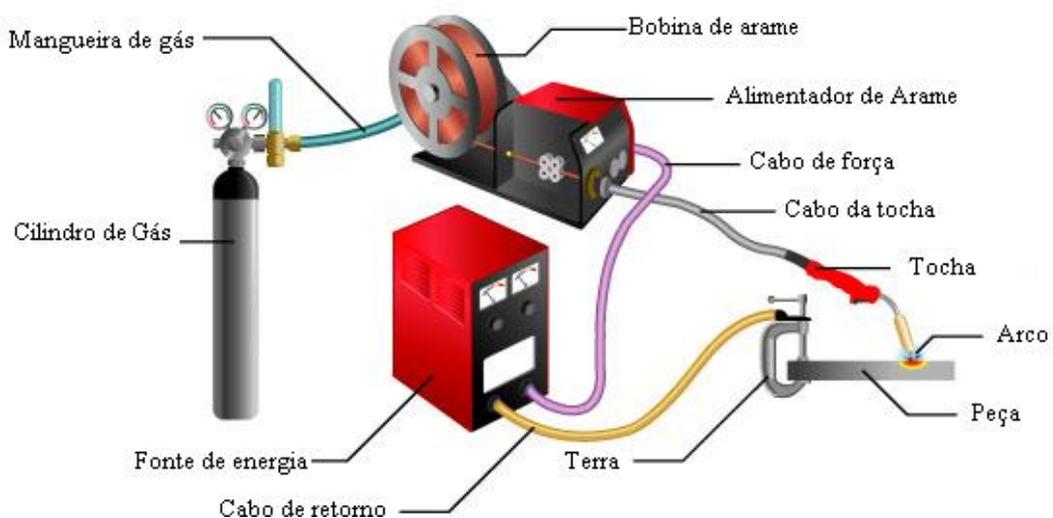


Figura 4 - Representação esquemática dos equipamentos do processo MIG/MAG.

A fonte de energia tem a função de fornecer a tensão e a corrente elétrica necessárias para estabelecer e manter o arco elétrico entre o eletrodo e a peça. Em fontes de soldagens

modernas, podem-se ajustar os parâmetros de tensão e corrente remotamente através de microcomputador. Se a fonte de soldagem apresenta controle de tensão (tensão constante), a velocidade de alimentação do arame eletrodo deverá ser ajustada em um valor constante (este modo de atuação é denominado de controle interno). Com a fonte ajustada para o modo de tensão constante, tem-se menor custo de equipamento, porém é limitada a utilização de arames eletrodo de pequenos diâmetros (até 1,2 mm). A fonte de energia com controle de corrente (corrente constante e corrente pulsada) necessita de um sistema de retroalimentação que permita ajustes instantâneos da velocidade de alimentação do arame eletrodo durante a soldagem. Este modo de atuação é denominado de controle externo, o seu custo é mais elevado e é mais adequado para arames eletrodo de diâmetros maiores devido à capacidade de resposta do sistema de retroalimentação (AWS, 2004).

O sistema de alimentação de arame eletrodo é constituído por um conjunto de roletes que tracionam o arame eletrodo e por um motor que possui velocidade de rotação que pode ser ajustada. Este sistema tem que apresentar boa velocidade de resposta, de modo a suprir as variações e imperfeições da junta a ser soldada, caso contrário a soldagem pode ficar com suas características e qualidade comprometidas.

A tocha de soldagem é constituída de um conduíte responsável pela condução do arame eletrodo até o bico de contato onde ocorre o contato elétrico; de uma canalização que, com o bocal, conduz o gás de proteção à poça de fusão, do bico de contato. Adicionalmente, pode haver um sistema de refrigeração da tocha, geralmente à água, para manter a temperatura da tocha de soldagem controlada. A Figura 5 ilustra uma tocha de soldagem MIG/MAG.

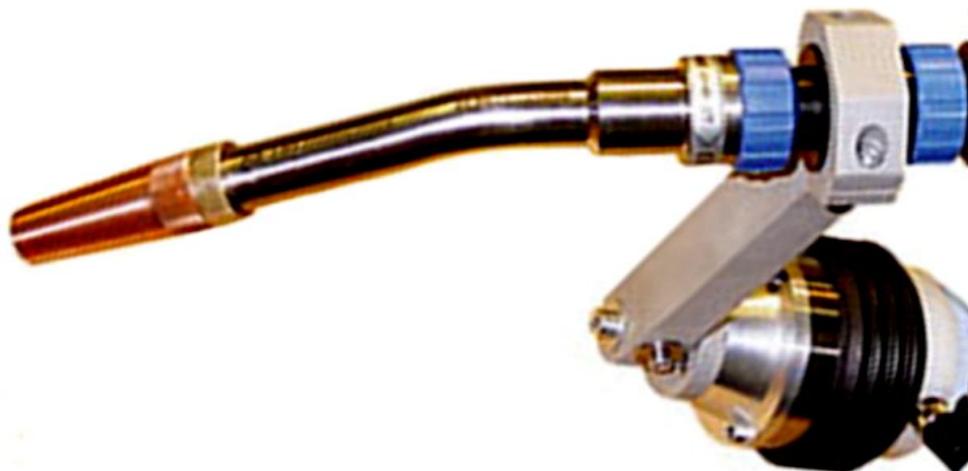


Figura 5 - Tocha robotizada para soldagem MIG/MAG.

3.13.2 Variáveis do processo MIG/MAG

O ajuste das variáveis de soldagem no processo MIG/MAG é bem complexo devido ao grande número de variáveis existentes e, muitas vezes, há interações entre elas, de tal forma que é fundamental o conhecimento e o controle destas variáveis para se conseguir soldas com a qualidade desejada. Assim uma seleção correta destas variáveis para uma dada aplicação depende de inúmeros fatores, incluindo (a) a disponibilidade de equipamentos e materiais; (b) considerações geométricas (espessura do componente, desenho da junta, posição de soldagem, etc); (c) metalúrgicas (tipo de material de base e sua sensibilidade ao ciclo térmico e às deformações associadas ao processo de soldagem); (d) econômicas (produtividade); (e) a necessidade de garantir um nível adequado de estabilidade para o processo e (f) de se reduzir a chance de formação de descontinuidades (mordeduras, inclusões de escória, falta de fusão, etc) no cordão de solda (ASM, 1993b; MODENESI, 2008).

A seguir são apresentadas algumas variáveis importantes na soldagem com o processo MIG/MAG, por afetarem o aspecto, a geometria e a qualidade total dos cordões de solda:

- tipo e intensidade de corrente de soldagem;
- polaridade da corrente;
- tensão do arco (comprimento do arco);
- velocidade de soldagem;
- comprimento do eletrodo (*Stickout*);
- distância entre o bico de contato e a peça (DBCP);
- indutância da fonte;
- velocidade de alimentação do arame;
- diâmetro do arame-eletrodo;
- composição química do arame-eletrodo;
- tipo de gás de proteção;
- vazão do gás de proteção;
- posicionamento da tocha em relação à peça;
- modo de transferência metálica

As principais variáveis de soldagem e suas influências são descritas a seguir:

a) Corrente de soldagem

A corrente de soldagem influencia fortemente a taxa de fusão do arame-eletrodo, a largura, a penetração e o reforço do cordão de solda. Com todas as outras variáveis do processo mantidas constantes um aumento na corrente proporciona um aumento na taxa de deposição, na penetração e na largura do cordão de solda. Quando se utiliza uma fonte de tensão constante, a corrente de soldagem é diretamente proporcional à velocidade de alimentação do arame (ASM, 1993b; MACHADO, 1996; MIRANDA, 1999).

b) Polaridade

O termo *polaridade* é usado para descrever a conexão elétrica da tocha de soldagem com relação aos terminais de corrente da saída da fonte de tensão. Como já foi comentado, no MIG/MAG geralmente utiliza-se CCEP, pois produz um arco estável, com bom perfil do cordão de solda, maior penetração e menor quantidade de respingos gerados (MACHADO, 1996; MIRANDA, 1999; MODENESI, 2008). A corrente contínua com eletrodo na polaridade negativa (CCEN) é raramente utilizada devido à transferência axial não ser possível sem modificações que não são aceitas comercialmente, mas esta polaridade tem como vantagens, em relação à CCEP, uma maior velocidade de fusão e uma menor penetração (MODENESI, 2008). A utilização da corrente alternada (CA) ainda está sendo estudada e aprimorada, mas seu emprego visa conciliar a elevada estabilidade do arco e a boa qualidade do cordão de solda em (CCEP), com a redução do aporte térmico no metal de base, o baixo valor de penetração do cordão e a maior deposição de metal de adição em (CCEN) (MACHADO, 1996; QUITES, 2002; PESSOA et al., 2004).

c) Tensão do arco

Esta variável está diretamente relacionada ao comprimento do arco, ou seja, mantendo as demais variáveis constantes, um acréscimo na tensão do arco resulta em aumento do comprimento do arco. No entanto, o mesmo comprimento do arco poderá estar relacionado com diferentes tensões, dependendo da corrente, do gás de proteção e do comprimento do eletrodo. A tensão é a principal variável na definição da largura do cordão de solda e em conjunto com a corrente exerce influência direta no modo de transferência metálica. Uma diminuição na tensão resulta em cordões com perfil estreito e mais abaulado. Um aumento tende a ocasionar cordões mais planos com maior largura da zona de fusão (ASM, 1993b). Em fontes com a curva característica estática de tensão constante, a tensão é regulada na

máquina, enquanto que, nas fontes com a curva característica estática de corrente constante, a mesma depende do comprimento do arco mantido pelo operador e do sistema tensão sensitivo (MACHADO, 1996; MARQUES et al., 2005).

d) Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem representa a taxa linear em que o arco se move ao longo da junta de solda. Observa-se que a penetração, primeiro aumenta e depois diminui com o aumento da velocidade de soldagem, sendo máxima para velocidades intermediárias. Este comportamento acontece, pois, quando a velocidade é muito baixa, a quantidade de material depositado por unidade de comprimento da solda aumenta, a poça de fusão fica com dimensões elevadas e o calor do arco atua diretamente na poça e não no metal de base, fazendo com que a penetração seja baixa. Porém, quando a velocidade de soldagem é muito alta, a quantidade de calor transferida por unidade de comprimento é reduzida e a penetração também diminui. E por fim, o uso de velocidades excessivas pode resultar em mordeduras e falta de penetração ao longo do cordão de solda (ASM, 1993b).

e) Comprimento do eletrodo (Stickout)

Esta variável representa o comprimento do arame não fundido a partir do bico de contato até o início do arco. Neste trecho de arame por onde passa corrente elétrica, gera-se calor por efeito Joule (RI^2). Quanto maior o comprimento do eletrodo, maior será o calor gerado por efeito Joule e conseqüentemente terá um acréscimo na taxa de fusão de material. Este calor gerado não só afeta a taxa de fusão de material, mas também influencia a taxa de deposição e a penetração do cordão de solda (ASM, 1993b; MACHADO, 1996; MARQUES et al., 2005).

f) Diâmetro do arame-eletrodo

O diâmetro do eletrodo influencia a forma do cordão de solda. Quanto maior o diâmetro do arame, maior será a corrente mínima necessária para a fusão do arame e para se obter as mesmas características de transferência metálica. Altas correntes também proporcionam altas taxas de deposição e grande penetração. Entretanto nas posições vertical e sobrecabeça, menores diâmetros de arame são utilizados com baixas correntes de soldagem (MIRANDA, 1999; AWS, 2004).

g) Ângulo de inclinação da tocha

Considerando o plano 1 da Figura 6, a tocha pode assumir dois tipos de inclinação na soldagem MIG/MAG. A primeira, correspondente ao ângulo α , é denominada de soldagem

“puxando” que direciona a tocha mais para poça de fusão, proporcionando uma maior taxa de transferência de calor para a peça, aumentando a penetração para ângulos de até cerca de 25° , quando depois começa a diminuir. A segunda, ângulo β , é denominada soldagem “empurrando” direciona a tocha mais para o metal base (mais frio) proporcionando uma redução na penetração e produzindo um cordão de solda mais largo e plano (MACHADO, 1996; AWS, 2004).

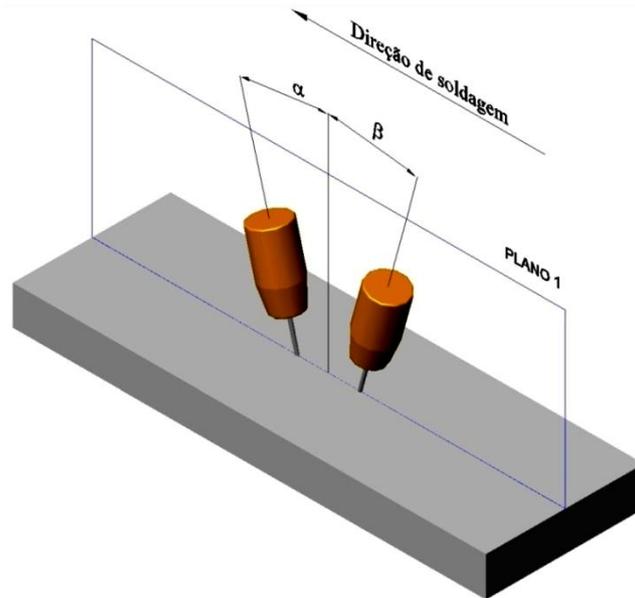


Figura 6 - Soldagem puxando e empurrando.

A tocha ainda pode ser inclinada de um ângulo γ no plano 2 da Figura 7 para facilitar a visualização do arco pelo operador na soldagem semi-automática e em soldagem de revestimento para minimizar a presença de defeitos no “pé” do cordão de solda.

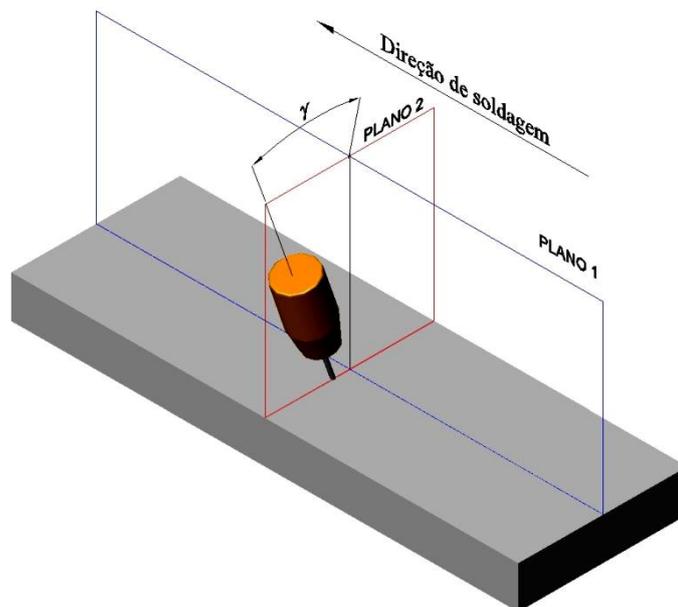


Figura 7 - Inclinação da tocha para visualização da solda pelo operador.

Assim como as variáveis apresentadas anteriormente, o modo de transferência metálica e o tipo de gás de proteção também são variáveis importantes na soldagem MIG/MAG, por isso serão detalhadas nos tópicos seguintes.

3.13.3 Consumíveis do Processo MIG/MAG

Basicamente, os consumíveis do processo MIG/MAG são os gases de proteção e os arames eletrodos.

a) Gases de Proteção:

Os gases de proteção têm a função de impedir a contaminação da gota metálica e da poça de fusão da ação nociva da atmosfera na soldagem. É necessário que haja esta proteção, pois a maioria dos metais, quando aquecidos ao ponto de fusão, reage com elementos químicos presentes na atmosfera. Os produtos das reações químicas entre a poça de fusão e a atmosfera (óxidos e nitretos) podem causar vários problemas na soldagem como: inclusão de escória, porosidade e endurecimento do metal de solda.

Os gases de proteção e sua vazão exercem influência sobre (AWS, 2004):

- características do arco;
- modo de transferência metálica;
- penetração e perfil da solda;
- velocidade de soldagem;
- ação de limpeza;
- propriedades mecânicas do metal de solda.

Dentre os gases de proteção para a soldagem MIG/MAG, os mais utilizados são argônio (Ar), hélio (He), dióxido de carbono (CO₂) e o oxigênio (O₂). É também comumente utilizada a mistura desses gases. A escolha dos gases dependerá da aplicação.

O Argônio é um gás inerte e possui maior densidade que o ar. Proporciona um arco estável e uma boa proteção da poça de fusão. Sua baixa energia de ionização facilita a reignição do arco e gera uma menor potência do arco, o que o torna mais adequado que o hélio para soldagens de ligas ferrosas em chapas finas ou fora de posição (AWS, 2004).

O Hélio, assim como o argônio, é inerte. Sua densidade é menor que a do ar. Sua alta energia de ionização dificulta a reabertura do arco, mas, por apresentar uma maior condutividade térmica que o argônio, este gás confere à solda uma grande penetração. Por isso é mais utilizado nas soldagens de materiais de elevada espessura, especialmente aqueles de elevada condutividade térmica, como o alumínio e o cobre. O hélio, por ser mais leve que

o ar e cerca de 10 vezes mais leve que o argônio, necessita de uma maior vazão para garantir uma proteção da poça de fusão adequada, o que acarreta em maior consumo e um maior custo, já que o custo do hélio é muito maior do que o do argônio na maioria dos países que não têm hélio em suas riquezas naturais (AWS, 2004).

O Dióxido de carbono é um gás ativo e tem como característica uma alta condutibilidade térmica. A utilização do CO₂ puro como gás de proteção apresenta uma vantagem muito grande em comparação à utilização de gases inertes que é o custo do gás. Este gás normalmente é utilizado nas soldagens de aço baixo carbono (AWS, 2004).

O Oxigênio também é um gás ativo e é utilizado como componente na mistura de gases, sobretudo na soldagem de aços. Tem como característica melhorar a estabilidade do arco e diminuir a tensão superficial da gota e da poça de fusão, deixando-a mais fluida e proporcionando a redução de respingos e uma transferência de metal da forma goticular (AWS, 2004).

O Nitrogênio apesar de ser considerado inerte em baixas temperaturas, reage com certos materiais (Al, Mg e Ti) de forma que não é utilizado como componente principal de uma mistura de gás de proteção. Tem alta entalpia, como o H₂, transferindo mais calor para a solda, mas favorece a formação de poros. O monóxido de nitrogênio (NO) é usado em baixíssimo percentual (< 0,035%) nas mistura à base de argônio para reduzir a emissão de ozônio no arco (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

A Figura 8 ilustra o perfil do cordão de solda característico para os gases e misturas comumente empregados no processo MIG/MAG. Todavia, deve-se lembrar que o perfil do cordão de solda também pode ser modificado por alterações nos parâmetros de soldagem.

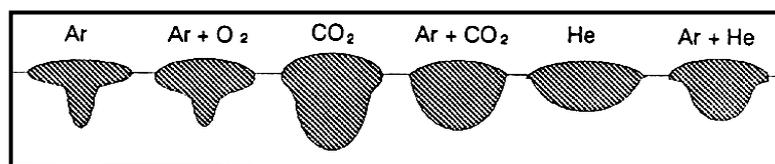


Figura 8 - Perfil de cordões de solda utilizando diferentes gases (MARQUES, 1991).

A mistura entre gases visa obter características intermediárias das suas respectivas propriedades. A adição de gases ativos (CO₂ e/ou O₂) aos gases inertes, como o argônio, tem como objetivo melhorar a estabilidade do arco. Estes elementos também contribuem para o aumento da penetração do cordão de solda.

A adição de elementos como o dióxido de carbono e o oxigênio também influenciam a transferência metálica. Adição de CO₂ ao argônio puro mudará proporcionalmente a transferência metálica de goticular para globular. Em aço carbono e aço inoxidáveis, uma

mistura de 10% de CO₂ em argônio poderá produzir transferência goticular. Uma mistura com mais de 15% de CO₂ em argônio será incapaz de produzir transferência goticular. A adição de CO₂ também contribuirá para o aumento da quantidade de fumos produzidos durante a soldagem. A adição de O₂ irá melhorar a fluidez da poça de fusão e o molhamento do mesmo (VAIDYA, 2002).

Mas em alguns casos, a adição de CO₂ e O₂ aos gases inertes podem causar porosidade e perdas de elementos de liga, como: cromo, vanádio, titânio, manganês e silício devido ao seu poder oxidante. Para se evitar este problema, deve-se utilizar arames com desoxidantes (AWS, 2004).

b) Arames Eletrodos:

Os arames eletrodos empregados no MIG/MAG apresentam geralmente a composição química próxima a do material a ser soldado, principalmente para soldagem de aços não ligados e com baixo teor de carbono.

A espessura do metal base influencia na escolha do diâmetro do eletrodo. Quanto mais espesso o metal base, maior o diâmetro do eletrodo a ser utilizado (BRANDI et al., 2004).

A Tabela 14 relaciona as especificações da AWS (American Welding society) de arames para soldagem MIG/MAG.

Tabela 14 - Especificações da AWS de materiais de adição para MIG/MAG (AWS, 2004).

Especificação	Materiais
AWS - A 5.10	Alumínio e suas ligas
AWS - A 5.7	Cobre e suas ligas
AWS - A 5.9	Aço inox e aços com alto Cr
AWS - A 5.14	Níquel e suas ligas
AWS - A 5.16	Titânio e suas ligas
AWS - A 5.18	Aço Carbono e baixa liga
AWS - A 5.19	Magnésio e suas ligas

3.13.4 Transferência Metálica

A eficiência do MIG/MAG é muito dependente do tipo de transferência metálica que ocorre da ponta do eletrodo para a poça de fusão, e nem sempre um determinado tipo de transferência pode conseguir as características comuns associadas ao processo MIG/MAG que são sua elevada produtividade, a boa qualidade da solda produzida e sua versatilidade (NIXON & NORRISH, 1988; AWS, 2004).

O modo pelo qual o material é transferido no arco determina: a estabilidade do processo, a possibilidade de soldagem em várias posições, a quantidade de respingos gerada, a qualidade e a geometria da solda e a aparência superficial do cordão de solda (NIXON & NORRISH, 1988; NORRISH, 1992).

Devido à grande influência na soldagem, o estudo dos fenômenos de transferência metálica começou quase que no mesmo período da implementação dos processos que empregam eletrodos consumíveis. Com isto, foram identificados os três principais tipos de transferência metálica, que são a transferência metálica por curto-circuito, a globular e a goticular ilustrados na Figura 9. O tipo de transferência é determinado por alguns fatores como a magnitude e o tipo de corrente, o diâmetro do arame eletrodo, a composição do arame e o gás de proteção (MIRANDA, 2002).

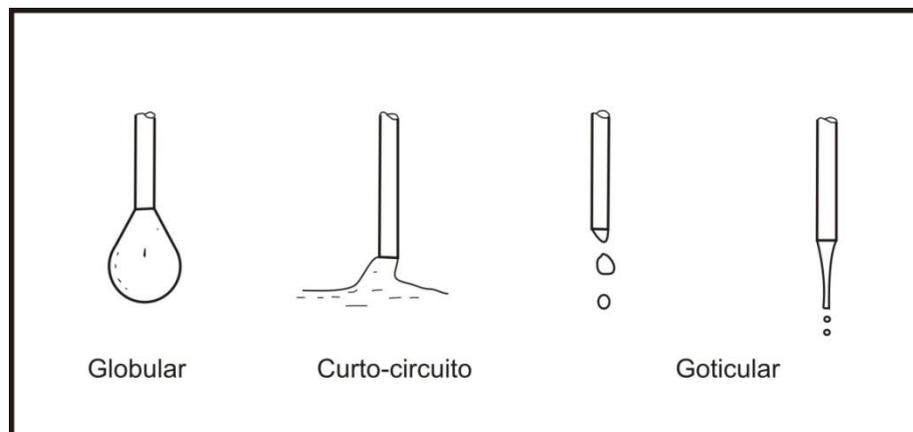


Figura 9 - Modos de transferência metálica do processo MIG/MAG (MODENESI, 2008).

A transferência metálica por curto-circuito: Ocorre geralmente com baixas tensões e correntes de soldagem, gerando o toque periódico do eletrodo (20 a 200 vezes por segundo) na poça de fusão e a formação de uma ponte entre o eletrodo e o metal de base. Durante o curto-circuito, a tensão entre o eletrodo e o metal de base diminui para valores próximos a zero, aumentando a intensidade da corrente. Nesta fase, o arco se extingue, e a gota é destacada devido à ação da tensão superficial e da força *pinch*. Após a gota ser transferida o arco é restabelecido e o ciclo recomeça.

Devido às extinções frequentes e também aos valores relativamente baixos de corrente e tensão, a poça fundida tem menor dimensão e o calor transferido à peça é baixo. Desta forma, este tipo de transferência é geralmente indicado para soldagem fora de posição e de chapas finas (AWS, 2004).

A transferência metálica globular: Este tipo de transferência se caracteriza pela transferência de gotas grandes, maiores que o diâmetro do eletrodo. A taxa de transferência é

baixa, sendo de 1 a 10 gotas por segundo. Utilizando gás de proteção a base de argônio, esta forma de transferência é obtida para correntes relativamente baixas e tensões elevadas. Entretanto, com CO₂, como gás de proteção, a transferência globular pode ser observada em correntes elevadas.

Quando a gota é formada, seu volume aumenta até que a força de tensão superficial não consegue mais mantê-la presa na ponta do arame e a gota se destaca pela ação da força peso e força eletromagnética e o arco deve ter um comprimento que permita o destacamento da gota antes do contato com a poça de fusão. Neste tipo de transferência, a força peso exerce importante influência e, devido a isto, a transferência globular limita-se à soldagem na posição plana. A geração excessiva de respingos e a instabilidade do arco são fatores que devem ser considerados, o que a torna geralmente um tipo de transferência metálica indesejada (AWS, 2004).

A transferência metálica goticular: Na soldagem MIG/MAG com proteção gasosa à base de misturas ricas em argônio e com o eletrodo na polaridade positiva, o diâmetro médio das gotas diminui gradativamente à medida que se aumenta a corrente de soldagem, até que, a um determinado nível de corrente (denominada corrente de transição), há uma diminuição brusca do diâmetro das gotas. Então há o destacamento regular de gotas com um diâmetro próximo ao diâmetro do eletrodo em alta frequência, o que caracteriza a transferência goticular.

Dentre os fatores que influenciam a corrente de transição pode-se citar a influência das características do eletrodo (diâmetro e composição, comprimento energizado, temperatura de fusão) e o tipo do gás de proteção.

Na transferência goticular, o arco passa a envolver toda a gota, e a força eletromagnética torna-se a principal responsável pela transferência da gota, projetando-a em direção a poça de fusão a uma aceleração maior que a aceleração da gravidade (AWS, 2004), independente da posição de soldagem.

O tipo de gás de proteção usado no processo MIG/MAG influencia significativamente a obtenção da transferência goticular. Um aumento gradual de CO₂ na mistura gasosa tende a aumentar o valor da corrente de transição, pois a alta condutividade térmica tende a restringir o arco, favorecendo a transferência globular (VAIDYA, 2002). Para adições acima de 30% de CO₂, a transferência goticular não é mais observada (MODENESI, 2008).

Geralmente a transferência goticular ocorre de forma bastante estável, com pouca perturbação do arco e poucos respingos. Entretanto, a faixa de corrente necessária para obtenção da transferência goticular dificulta sua aplicação na soldagem de chapas finas,

devido ao excesso de calor imposto. Adicionalmente, a poça de fusão pode se tornar excessivamente grande, dificultando sua aplicação na posição sobre cabeça.

3.13.5 A corrente pulsada no MIG/MAG

A pulsação de corrente tem por objetivo permitir uma transferência goticular a baixas correntes médias. Neste modo de operação, um arco contínuo é mantido por uma corrente baixa durante certo período de tempo (corrente de base e tempo de base). A corrente é então elevada a um alto nível por um curto espaço de tempo (corrente de pulso e tempo de pulso), forçando o destacamento da gota como pode-se verificar na Figura 10. Devido à redução na energia média do arco, este processo é indicado para soldagens de chapas finas e para soldagens fora da posição (MOTTA, 2002).

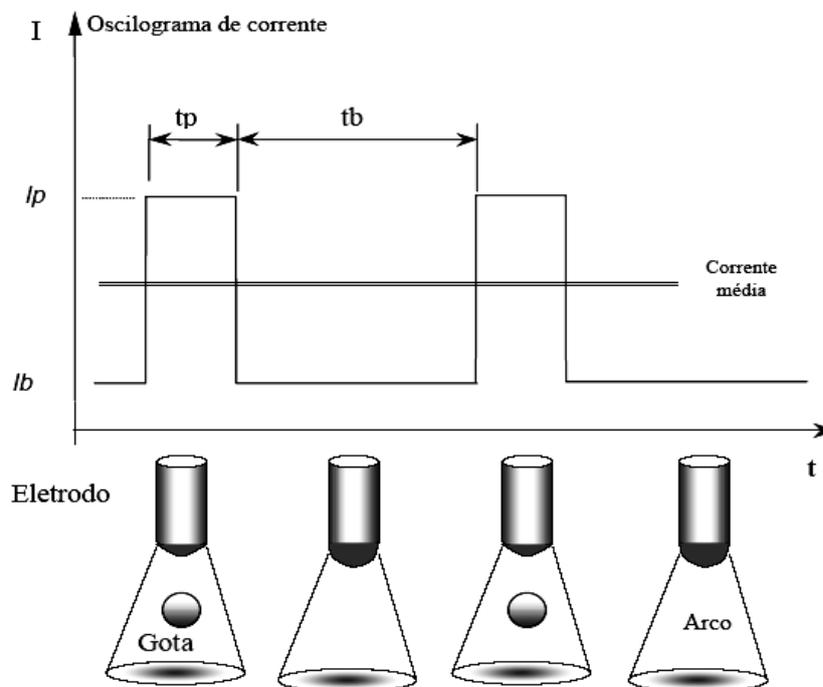


Figura 10 - Oscilograma de corrente ilustrando os instantes de destacamento da gota.

As vantagens desse processo são: (i) a redução de salpicos em relação à transferência por curto-circuito, (ii) a melhoria no controle da transferência metálica e (iii) o baixo aporte térmico à peça soldada, assim, obtendo cordões de solda com boa qualidade. Uma transferência satisfatória é conseguida pela escolha adequada dos parâmetros de pulso e de base que são determinados experimentalmente por tentativa e erro. Um princípio largamente adotado para a determinação dos parâmetros apropriados é escolher os que fornecem uma gota por pulso com destacamento no fim do pulso, obtendo-se assim uma transferência metálica uniforme, com um relativo baixo aporte térmico e uma melhoria no controle de material depositado na peça (GOHR, 2002).

A determinação dos parâmetros de pulso é baseada em três requisitos essenciais: (i) o tipo de transferência metálica deve ser goticular, porém, com baixas velocidades de alimentação de arame, as quais, em corrente constante, resultariam em transferência do tipo globular; (ii) a velocidade de arame deve ser balanceada com a taxa de fusão, de tal forma que o comprimento do arco seja mantido constante e (iii) a corrente de base exceda um valor mínimo para que se obtenha um arco estável, pois, abaixo desse valor, o arco tende a se extinguir (AMIN, 1983a; 1983b).

3.14 Características operacionais

3.14.1 Características geométricas

A geometria do cordão de solda afeta diretamente a complexidade do projeto e assim o custo de fabricação de estruturas soldadas e equipamentos mecânicos. As características geométricas do cordão de solda são a largura (L), o reforço (R) e a penetração (P) medidos a partir da seção transversal da solda (Figura 11).

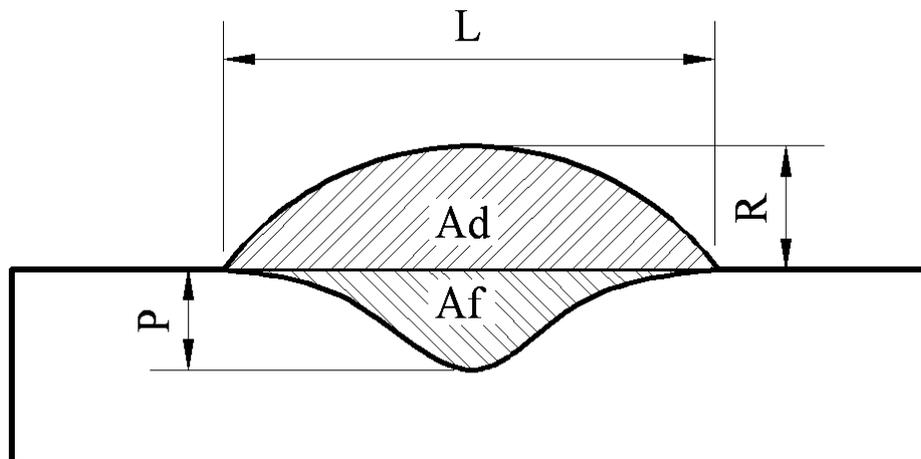


Figura 11 - Representação esquemática das dimensões geométricas das seções transversais dos cordões de solda.

Muitos estudos já foram feitos de forma a avaliar as características geométricas do cordão de solda e como estas são afetadas pelos parâmetros de soldagem. Vários resultados indicam que o perfil do cordão pode ser controlado pelos parâmetros de soldagem como corrente, tensão, velocidade de soldagem, gases de proteção, extensão e diâmetro do eletrodo, polaridade, espessura e composição da chapa (CHAN et al., 1999).

A grande maioria dos pesquisadores ressalta que a largura do cordão é diretamente proporcional à tensão do arco e ao diâmetro do consumível e é inversamente proporcional à velocidade de soldagem. Por sua vez, a penetração é diretamente proporcional à concentração de energia e à pressão do arco elétrico sobre o material de base. Um grande número de

problemas pode ser citado devido à não adequação dos parâmetros de soldagem utilizados, acarretando muitas vezes em descontinuidades do cordão, como falta de fusão do metal depositado, porosidades excessivas, falta de penetração, acentuados reforços, diminuta largura do cordão, falta de preenchimento da junta entre outros (NORRISH, 1992).

Determinar ótimas condições de soldagem para uma dada situação é uma tarefa muito complexa por causa do número de variáveis envolvidas. Extensivas tentativas são geralmente necessárias para fixar as variáveis na maioria dos casos. A habilidade para prever e controlar a geometria do cordão irá reduzir o número de tais tentativas e simplificar o processo, fixando na prática, os parâmetros de soldagem (CHAN et al., 1999).

A diluição (D) também é uma característica geométrica importante, pois representa a parcela de metal de base que entra na composição da zona fundida (metal de solda). Para a maioria das aplicações (soldagens em aços de baixo carbono), a diluição é de pouca importância com relação ao comportamento da junta em serviço, porém, em algumas aplicações "especiais", como na soldagem de metais dissimilares e na soldagem de revestimentos, esta característica pode ser determinante no desempenho do componente, podendo inclusive favorecer falhas durante a operação do equipamento quando se tem elevada diluição. A diluição para um simples cordão pode ser calculada pela Equação 1.

$$D = \frac{A_f}{(A_d + A_f)} \times 100 (\%) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Ad – Área depositada do cordão (Figura 11)

Af – Área fundida do metal de base (Figura 11)

3.14.2 Características econômicas

O desempenho econômico é um dos fatores de maior relevância na seleção de um processo de soldagem, pois está diretamente ligado aos custos do processo. Existem muitas variáveis capazes de influenciar no desempenho econômico, entre elas podemos citar o tipo de transferência metálica, a composição química, os parâmetros operacionais, etc. Os valores da taxa de fusão (TF), da taxa de deposição (TD) e da eficiência de deposição (ED) definem as características econômicas do consumível na soldagem a arco elétrico.

- **Taxa de fusão do arame (TF)** é a quantidade de massa fundida do arame por unidade de tempo, e pode ser calculada pela Equação 2.

$$TF = \frac{3,6 \cdot \rho_a \cdot l_a}{t_s} \left(\frac{Kg}{h} \right) \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

ρ_a é a densidade linear do arame (g/m)

l_a é o comprimento do arame consumido (m)

t_s é o tempo de soldagem (s)

- **Taxa de deposição do arame (TD)** é a quantidade de massa fundida do arame por unidade de tempo que realmente foi incorporada ao metal de solda, dada através da Equação 3.

$$TD = \frac{3,6 \cdot (m_f - m_i)}{t_s} \left(\frac{Kg}{h} \right) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

m_f é a massa inicial da chapa (g)

m_i é a massa final da chapa (g)

t_s é o tempo de soldagem (s)

- **Eficiência de deposição (ED)** é a razão entre as taxas de deposição e de fusão obtidas durante a operação de soldagem, como mostra a Equação 4.

$$ED = \frac{TD}{TF} \times 100 (\%) \quad \text{Equação 4}$$

3.14.3 Custos diretos de soldagem

De forma geral, o custo direto para soldagens utilizando o processo MIG/MAG é composto por uma série de outros custos, dentre eles destacam-se os custos relacionados aos insumos (Energia, gás de proteção, arame eletrodo), os custos associados à mão de obra e os custos gerais (associados aluguel, depreciação e manutenção dos equipamentos, encargos sociais e etc.). As equações necessárias para calcular o custo direto total por unidade de peso do metal de adição para soldagens utilizando o processo MIG/MAG são descritas a seguir (AWS, 2004).

- Custo do gás (C_G) por unidade de peso de metal depositado (R\$/kg)

$$C_G = \frac{G \times F}{TD} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

TD = taxa de deposição (kg/h);

F = vazão de gás (m^3/h);

G = custo unitário de gás (R\$/ m^3)

- Custo da energia (C_E) por unidade de peso de metal depositado (R\$/kg)

$$C_E = \frac{P \times V \times A}{1000 \times TD} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

A = corrente de soldagem (A);

V = tensão (V);

P = custo da energia (R\$/kWh).

- Custo do arame-eletrodo (C_{AE}) por unidade de peso de metal depositado (R\$/kg)

$$C_{AE} = \frac{M}{ED} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

M = custo do arame-eletrodo (R\$/kg);

ED = eficiência de deposição (%);

- Custo do soldador (C_S) por unidade de peso de metal depositado (R\$/kg)

$$C_S = \frac{S \times K}{TD \times 100} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

K = fator de operação (%);

S = Salário do soldador (R\$/h);

- Custos gerais (C_{Ge}) por unidade de peso de metal depositado (R\$/kg)

$$C_{Ge} = \frac{O}{TD \times (K/100)} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

O = custos gerais (R\$/h);

- Custo direto total (C_{DT}) por unidade de peso de metal depositado (R\$/kg)

$$C_{DT} = \frac{C_G + C_E + C_{AE} + C_S + C_{Ge}}{TD \times (K/100)} \quad \text{Equação 10}$$

3.15 Método Taguchi / Projeto Robusto

Este método visa determinar as variáveis (denominadas de fatores) que mais influenciam a variabilidade do processo ou produto. O controle destes fatores garante a qualidade do processo/produto (menor variabilidade), além da otimização do seu desempenho. O método Taguchi pertence a uma classe de abordagens que assegura a qualidade através do projeto, neste caso através da identificação e do controle de variáveis críticas (ou ruídos) que fazem ocorrer desvios na qualidade do produto ou processo (VIEIRA, 1996).

A técnica denominada projeto robusto, desenvolvida por Taguchi, é uma ferramenta poderosa na otimização de produtos ou processos e pode ser definida como um conjunto de conceitos, estratégias e métodos que utiliza o conhecimento existente de engenharia para realizar os seguintes benefícios (ROSS, 1991):

- melhoria da qualidade;
- minimização do custo;
- minimização do tempo de desenvolvimento.

Estes benefícios são obtidos através da determinação e controle das variáveis (chamadas de fatores de controle).

3.15.1 Desenvolvimento do Projeto Robusto

Os níveis (valores) de fatores controláveis (parâmetros do projeto) são selecionados para minimizar os efeitos de fatores perturbadores nas características funcionais do produto, ou seja, determinam-se os níveis dos diferentes parâmetros que proporcionam ao produto as suas qualidades funcionais e que minimizam a perda de qualidade. Em outras palavras, procura-se estabelecer os níveis dos parâmetros do produto de modo que a característica de qualidade deste torne-se insensível ou robusta às fontes de variação (fatores de ruído), mantendo o valor médio da resposta sobre o valor objetivo de maneira consistente, obtendo alto desempenho e baixo custo, simultaneamente (ROSS, 1991; VIEIRA, 1996)

3.15.2 Projeto dos parâmetros

A resposta do produto considerada para o propósito de otimização em um delineamento de experimento robusto é chamada de característica de qualidade. Vários parâmetros podem influenciar a característica de qualidade ou resposta do produto. Estes parâmetros classificam-se dentro das seguintes três classes (note que a palavra parâmetro equivale à palavra fator na literatura de Projeto Robusto):

- Fatores de sinal (M): Este é o grupo de parâmetros para o usuário ou operador expressar o valor pretendido para a resposta do produto. Os fatores de sinal são selecionados pelo engenheiro de projeto, baseado no conhecimento da engenharia do produto que está se desenvolvendo (GOMES, 2006).
- Fatores de ruído (X): Certos parâmetros não podem ser controlados pelo projetista, sendo estes parâmetros chamados de fatores de ruído (GOMES, 2006).
- Fatores de controle (Z): Estes são parâmetros que o projetista pode especificar livremente. De fato, é responsabilidade do projetista determinar o melhor valor destes parâmetros. Cada fator de controle pode ter múltiplos valores, chamados níveis. Quando se muda os níveis de certos fatores de controle, o custo de fabricação não muda (GOMES, 2006).

Identificar respostas importantes, fatores de sinal, fatores de ruído e fatores de controle em um projeto específico são questões importantes. Em um delineamento de Projeto Robusto é também importante reconhecer quais fatores de controle mudam o custo de fabricação. A melhor situação, dos parâmetros que não afetam o custo de fabricação, é determinada através do projeto do parâmetro (GOMES, 2006).

3.15.3 Razão Sinal/Ruído

É a função objetiva (η) empregada no Método Taguchi. O uso da razão S/R tem a vantagem de que, uma vez obtido o melhor ajuste que minimize a sensibilidade ao ruído para um dado valor médio de um parâmetro estudado, esse ajuste também é válido para outro valor médio deste parâmetro.

a) Sinal/ Ruído

Os parâmetros de controle que contribuem na redução de variação (aprimoramento da qualidade) podem ser rapidamente identificados observando o quanto de variação aparece como resposta. A metodologia Taguchi idealiza uma transformação dos dados da repetição em outro valor, que representa a variação da medição existente. Designa-se a transformação

como relação sinal-ruído (S/R) ou função objetiva. A função objetiva para ser maximizada, nas resoluções dos problemas estatísticos de projeto de processo/produto, tem que ser escolhida corretamente. As diversas relações S/R disponíveis, de acordo com o tipo de característica, são:

- Menor é melhor;
- Maior é melhor;
- Nominal é melhor.

Cada característica tem a equação específica para o cálculo de η (ROSS, 1991). Como serão mostradas a seguir:

- Problemas do tipo “menor é o melhor”:

Usado quando se deseja minimizar os resultados. Como exemplo de menor é melhor pode-se citar o número de defeitos de uma peça, os índices de convexidade, a diluição e o número de respingos durante uma soldagem. O η neste caso é dado pela Equação 11 (ROSS, 1991).

$$\eta = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n_i} \times \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

n_i = número de repetições num ensaio (número de repetições independente dos níveis de ruído)

y_i é a característica da qualidade (resposta observada).

- Problemas do tipo “maior é o melhor”:

Usado quando se deseja maximizar os resultados. Como exemplo de aplicação da função maior é melhor pode-se citar o rendimento de um equipamento, as taxas de fusão e deposição e a qualidade do cordão de solda na soldagem. Assim, os níveis ótimos das variáveis de influência são aqueles que maximizam o η apropriado para cada análise estatística específica. O valor de η é determinado neste caso pela Equação 12 (ROSS, 1991).

$$\eta = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n_i} \times \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

n_i = número de repetições num ensaio (número de repetições independente dos níveis de ruído)

y_i é a característica da qualidade (resposta observada).

- Problemas do tipo “nominal é o melhor”:

Usado quando se deseja obter um valor desejado dentre os resultados. Este tipo de problema é frequentemente encontrado na engenharia, onde se deseja, por exemplo, obter a dimensão específica de um componente com certa tolerância. A função objetiva a ser maximizada para estes problemas é dada pela Equação 13 (ROSS, 1991).

$$\eta = 10 \log_{10} \frac{\mu^2}{\sigma^2} \quad \text{Equação 13}$$

Com:

$$\mu = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^{n_i} y_i \quad e \quad \sigma = \left[\frac{1}{n_i - 1} \sum_{i=1}^{n_i} (y_i - \mu)^2 \right]$$

Onde temos:

n_i = número de repetições num ensaio (número de repetições independente dos níveis de ruído)

y_i é a característica da qualidade (resposta observada).

b) Parâmetros de controle e de ruído

A Metodologia Taguchi distingue os parâmetros em dois grupos principais: (i) parâmetros de controle e (ii) parâmetros de ruído. Parâmetros de controle são aqueles estabelecidos pelo fabricante e que não podem ser diretamente modificados pelo consumidor. Os parâmetros de ruído são aqueles sobre os quais o fabricante não possui controle direto, mas que variam de acordo com o ambiente e hábito do consumidor. Parâmetros de ruído podem ser classificados em três categorias (GOMES, 2006):

- Ruídos externos são aqueles relacionados aos fatores ambientais, como temperatura ambiente, umidade, pressão ou pessoas. Ruídos externos provocam variações externamente ao produto;
- Ruídos internos estão relacionados com a função e com o tempo, tais como deterioração, desgaste, desaparecimento gradual da cor, encolhimento e ressecamento; ruídos internos causam variação no interior do produto;
- Ruído do produto manifesta-se como variação de peça para peça. São ocasionados durante a fabricação, mudando uma determinada característica entre dois ou mais produtos.

3.15.4 Arranjo ortogonal

O arranjo ortogonal (AO) facilita e reduz o número de experimentos. As colunas da matriz representam os fatores a serem estudados, e as linhas, os experimentos que serão realizados. Na matriz ortogonal, colunas podem ser deixadas vazias (que correspondem às variáveis a serem estudadas) sem prejuízo na análise. Linhas vazias, o que corresponde a deixar de realizar algum experimento, prejudica a ortogonalidade e compromete a análise e a confiabilidade dos experimentos (VIEIRA, 1996).

A escolha adequada da matriz ortogonal empregada deverá obedecer algumas exigências. Essas exigências envolvem as seguintes determinações:

- do número de fatores a serem estudados;
- do número de níveis para cada fator;
- das possíveis interações a serem estimadas;
- das dificuldades na execução dos experimentos.

As três primeiras observações estão relacionadas aos graus de liberdade associados. Os graus de liberdade são definidos, como o número total de comparações independentes que podem ser realizadas dentro de um conjunto de dados. O número de graus de liberdade para um fator é igual ao número de níveis menos um (n° de níveis - 1). O número de graus de liberdade para uma interação entre dois fatores é igual ao produto entre o número de graus de liberdade de cada fator (MCCONNELL & MCPHERSON, 1997).

O número na designação do arranjo indica o número de graus de ensaios contidos no mesmo, sendo o número de graus de liberdade disponíveis num certo arranjo equivalente ao número de ensaios menos um (o arranjo L8 possui 7 graus de liberdade disponíveis) (ROSS, 1991). Um exemplo de matriz ortogonal é ilustrado na Tabela 15.

Tabela 15 - Matriz ortogonal L8.

Projeto Robusto							
Experimento	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

O número à esquerda de cada fila é chamado de número do experimento ou número da distribuição, e vai de 1 a 8. Os alinhamentos verticais são chamados de colunas do arranjo ortogonal, e todas as colunas contêm quatro vezes os numerais 1 e 2. Quando cada uma das duas colunas consiste de numerais 1 e 2 e as quatro combinações (11), (12), (21) e (22) aparecem com a mesma frequência, diz-se que estas duas colunas estão balanceadas ou são ortogonais. Existem outros arranjos ortogonais como o arranjo ortogonal L8. Entre os arranjos ortogonais mais frequentemente usados estão o L9, L16, L18, L27 e L32. Para os propósitos deste trabalho, foi utilizado o arranjo ortogonal L9, ou seja, nesta matriz os ensaios são realizados através de nove experimentos.

3.15.5 Experimentação e análise

A metodologia do projeto robusto permite ao engenheiro gerar as informações necessárias para tomar decisões com pouco esforço experimental. O mensuramento da qualidade durante o projeto e o desenvolvimento e a experimentação eficiente para encontrar informações confiáveis sobre os parâmetros de projeto são duas importantes questões para serem desenvolvidas no projeto robusto (VIEIRA, 1996).

Vários autores, com pequenas alterações nos termos e/ou nas etapas a serem seguidas, mostram como se realiza o delineamento de experimentos pelo método Taguchi. Para maior aprofundamento, recomendam-se as referências: (ROSS, 1991; VIEIRA, 1996; ANTONY et al., 1999; PAN et al., 2005). As principais etapas são:

- Objetivo/ meta do experimento:

Procura-se nesta etapa determinar os fatores mais importantes que afetam as características da qualidade (ou respostas) e conseqüentemente reduzir a variabilidade nas respostas.

- Seleção das características de qualidade:

Identificado o objetivo do experimento, nesta etapa são selecionadas as respostas apropriadas para o experimento. As respostas de interesse mostram as características que se quer obter do produto/processo analisado.

- Identificação dos fatores de controle e S/R:

Esta etapa consiste na seleção de fatores que podem influenciar as características da qualidade bem como a seleção dos níveis dos fatores. Os fatores de controle são aqueles que podem ser controlados sob condições normais de produção. Primeiramente temos a seleção de fatores ruídos, que são os fatores que causam variação no desempenho funcional do

produto/processo. E posteriormente temos a seleção de fator sinal, os quais, afetam somente a média do processo/produto

- Escolha do arranjo ortogonal (AO):

Seleção apropriada do AO de acordo com o número de fatores e seus níveis que encaixe perfeitamente com o pretendido para o estudo, com economia de tempo, trabalho e número de ensaios.

- Preparação experimental:

Nesta etapa são elaboradas as matrizes de projeto codificadas e decodificadas para o experimento e análise dos resultados respectivamente.

- Análise estatística e interpretação dos resultados:

Na metodologia Taguchi o objetivo sempre é reduzir a variabilidade nas respostas. O S/R é uma medida do desempenho da variabilidade do produto/ processo na presença dos fatores ruídos. A idéia é maximizar o S/R e, desse modo, minimizar os efeitos dos fatores ruídos.

- Confirmação experimental:

Alguns ensaios são feitos para a condição ótima e comparados com os resultados previstos por Taguchi, para concluir se são satisfatórios e válidos.

CAPÍTULO IV

MATERIAIS E MÉTODOS

4. Materiais e Métodos

Neste capítulo serão apresentados e descritos todos os procedimentos experimentais empregados nos ensaios, bem como os equipamentos, os acessórios e os materiais de consumo utilizados. O objetivo deste capítulo é reunir as informações necessárias de forma que seja possível a compreensão e reprodução das condições dos ensaios.

4.1 Materiais de consumo

Os materiais de consumo empregados neste trabalho estão agrupados em três categorias: os corpos de prova, os arames eletrodo e os gases de proteção.

4.1.1 Corpos de prova

Os materiais dos corpos de prova utilizados foram chapas de aço ASTM A36 para os ensaios preliminares e placas de aço ASTM A516 grau 60 para os ensaios definitivos. A Tabela 16 mostra as composições químicas destes materiais, segundo seus fabricantes.

Tabela 16 - Composição química (% em peso) dos corpos de prova segundo o fabricante.

Item	Composição, peso %							
	Ni	C	Cr	Mo	Fe	Al	Mn	Si
ASTM A516 Gr60	0,01	0,15	0,02	0,01	Bal.	0,02	0,95	0,2
	Composição, peso %							
ASTM A36	C		Mn		P		S	
	0,18 - 0,23		0,30 - 0,60		0,030 máx.		0,050 máx.	

4.1.2 Arame eletrodo

Foram utilizados como metais de adição os seguintes arames eletrodo ($\varnothing = 1,2$ mm): o AWS ERNiCrMo-3 (UNSN06625), o AWS ERNiCrMo-4 (UNSN10276) e o AWS ERNiCrMo-14 (UNSN06686). A Tabela 17 mostra as composições químicas dos arames segundo dados dos fabricantes.

Tabela 17 - Composição química (% em peso) do arame eletrodo segundo o fabricante.

Item	Composição, peso %							
	Ni	C	Cr	Mo	Fe	Co	Cu	Mn
ERNiCrMo-4 (UNSN10276)	56,80	0,002	16,13	16,28	6,07	0,13	0,06	0,52
	Si	W	P	S	V	N		
	0,03	3,38	0,07	0,002	0,17	0,009		
ERNiCrMo-3 (UNSN06625)	Composição, peso %							
	Ni	C	Cr	Mo	Fe	Cu	Al	Ti
	64,43	0,011	22,2	9,13	0,19	0,01	0,09	0,23
	Nb	Mn	Si	Co	P	S		
3,53	0,01	0,05	0,03	0,002	0,002			
ERNiCrMo-14 (UNSN06686)	Composição, peso %							
	Ni	C	Cr	Mo	Fe	Cu	Al	Ti
	58,22	0,01	20,53	16,39	0,29	0,01	0,26	0,04
	Mn	Si	W	P	S	Outros		
0,23	0,059	3,97	0,002	0,001	0,50			

4.1.3 Gás de proteção

Nos ensaios, foram utilizados três gases de proteção: argônio Puro (100%Ar), uma mistura gasosa contendo 70% de argônio e 30% de hélio (70%Ar + 30%He) e uma mistura gasosa contendo 99,97% de argônio e 0,03 % de óxido nítrico (99,97%Ar + 0,03% NO).

4.2 Equipamentos e acessórios

A descrição dos equipamentos e acessórios empregados neste trabalho tem como objetivo informar as características de cada dispositivo empregado e sua aplicação.

4.2.1 Equipamentos empregados nas soldagens

Serão apresentadas a seguir as características operacionais dos equipamentos utilizados na realização das soldagens, como se vê na Figura 12.

- Robô industrial para deslocamento automático da tocha de soldagem com incerteza de $\pm 0,1$ mm no posicionamento (1).
- Uma fonte de soldagem eletrônica multiprocessado com corrente máxima de 550A (2).
- Sistema de aquisição de dados para adquirir os sinais de tensão e corrente operando em frequência de 9600 Hz (3).
- Um medidor de velocidade de alimentação de arame - Valim (4).

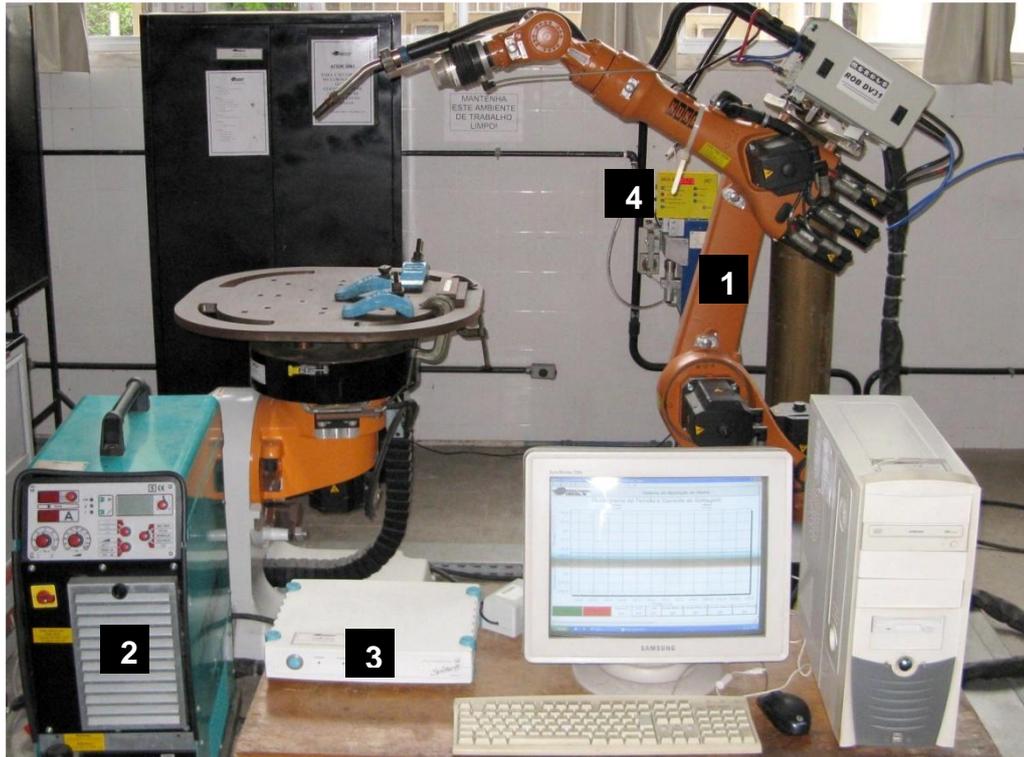


Figura 12 - Equipamentos utilizados nas soldagens: (1) robô industrial, (2) fonte eletrônica multiprocesso, (3) Sistema de aquisição, (4) Medidor de Valim.

4.2.2 Equipamentos para preparação metalográfica

A seguir, são descritos os equipamentos utilizados para preparação dos corpos de provas soldados para análises metalográficas.

- Cortadeira metalográfica Discoton, equipamento utilizado para corte das amostras.
- Lixadeira e politriz.
- Máquina fotográfica digital.
- Régua metálica graduada.

4.3 Metodologia

Com intuito de atingir os objetivos estabelecidos, o trabalho foi dividido em três etapas experimentais:

- A primeira etapa consistiu em um estudo exploratório destinado a encontrar faixas de parâmetros de soldagem destinados à transferência por curto-circuito. Esta etapa foi nomeada de “Ensaios preliminares”.
- A segunda etapa consistiu em realizar soldagens com alguns dos parâmetros pré-estabelecidos na etapa anterior sendo esta nomeada de “Ensaios definitivos”.

- E por fim, na terceira etapa, nomeada de “soldagem de revestimento”, foram realizadas soldagens com base nos resultados obtidos na segunda etapa.

Estas três etapas e outros procedimentos utilizados neste trabalho serão apresentados com maiores detalhes a seguir.

4.3.1 Etapa 1 - Ensaios preliminares

a) Realização dos ensaios

Esta etapa consistiu na realização de ensaios exploratórios, devido à necessidade de um mapeamento e de um melhor entendimento da faixa operacional dos parâmetros de soldagem, para obtenção da transferência metálica por curto-circuito no processo MIG/MAG operando em modo de tensão constante. Nesta etapa foram utilizadas as seguintes variáveis de controle: tensão de referência (U_r), velocidade de alimentação (V_{lim}), velocidade de soldagem (V_s) e efeito do tecimento (Tecimento). E como variáveis de resposta para escolha dos melhores parâmetros para etapa seguinte foram adotados os seguintes critérios: aspecto superficial, diluição e a razão reforço/largura (R/L).

A energia corrigida (E_c), o percentual de arco aberto (%AA) e número de curtos-circuitos (N_{cc}) também foram utilizados nesta etapa com o intuito de auxiliar no entendimento da influência das variáveis de controle sobre as características geométricas. A energia corrigida representa o valor real da energia de soldagem em uma transferência metálica por curto-circuito e foi calculado por um programa utilizando a Equação 14. O percentual de arco aberto (Equação 17) é a razão entre o tempo total em que o arco permanece aberto e o tempo total de aquisição (5 segundos). E o número de curtos-circuitos é o número total de curtos ocorridos durante o tempo de aquisição da soldagem (5s).

$$E_c = \sum_{i=1}^{N_{cc}} E_{aa} + \sum_{i=1}^{N_{cc}} E_{cc} \left(\frac{KJ}{cm} \right) \quad \text{Equação 14}$$

Onde temos que:

- Energia de arco aberto (E_{aa}) é dada pela Equação 15:

$$E_{aa} = \frac{U_{efaa} \cdot I_{efaa}}{V_s} \times \left(\frac{60_{s/min}}{1000_{J/KJ}} \right) \left(\frac{KJ}{cm} \right) \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

E_{aa} é a energia de soldagem no instante em que o arco está aberto (KJ/cm)

$U_{ef_{aa}}$ é a tensão eficaz de arco aberto (V)

$I_{ef_{aa}}$ é a corrente eficaz de arco aberto (A)

V_s é a velocidade de soldagem (cm/min)

- Energia de curto-circuito (E_{cc}) é dada pela Equação 16:

$$E_{cc} = \frac{\left(\frac{\rho \cdot l_e}{A}\right) \cdot I_{ef_{cc}}^2}{V_s} \times \left(\frac{60_{s/min}}{1000_{J/KJ}}\right) \left(\frac{KJ}{cm}\right) \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

E_{cc} é a energia de soldagem no instante em que ocorre o curto-circuito (KJ/cm)

ρ é a resistividade do material do arame eletrodo a me no momento do curto ($\mu\Omega.m$)

l_e é o comprimento energizado do arame no instante em que ocorre o curto-circuito (m)

A é a área da seção transversal do arame eletrodo (m^2)

$I_{ef_{cc}}$ é a corrente eficaz de curto-circuito (A)

V_s é a velocidade de soldagem (cm/min)

- Percentual de arco aberto (%AA) é dada pela Equação 17:

$$\%AA = \frac{t_{aa}}{t_{ta}} (\%) \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

t_{aa} é o tempo de arco aberto (s)

t_{ta} é o tempo de aquisição (s)

Os ensaios foram feitos na forma de um fatorial completo dos fatores de controle, onde foram utilizadas quatro tensões de referência ($U_r = 20, 22, 24$ e 26 V), quatro velocidades de alimentação ($V_{lim} = 5, 6, 7$ e 8 m/min), duas velocidades de soldagem ($V_s = 0,2$ e $0,4$ m/min) e, por fim, dois tipos de tecimento (Sem Tecimento e Tecimento triangular). A sequência de execução dos ensaios e os níveis dos parâmetros de soldagem são apresentados na Tabela 18 e na Tabela 19. Nestes ensaios, as soldagens foram realizadas na posição plana por simples deposição do arame eletrodo AWS ERNiCrMo-3 com diâmetro de 1,2 mm em chapas de aço baixo carbono ASTM A36 com dimensões de 200 x 50 x 6 mm. Foi empregado, como gás de proteção, argônio puro a uma vazão de 20 L/min, e a distância entre o bico de contato e a peça (DBCP) foi mantida em 20 mm para todas as soldagens. Antes de serem soldados, os corpos de prova foram limpos mecanicamente por uma escova com cerdas de aço, para a remoção de possível contaminação da superfície do corpo de prova.

Tabela 18 - Parâmetros de soldagem para os ensaios preliminares com $V_s = 0,2$ m/min.

Ensaio	Ur (V)	Valim (m/min)	Tecimento	Uef (V)	Ief (A)
1	20	5,0	ST	21,6	121,5
2	20	6,0	ST	20,5	137,3
3	20	7,0	ST	20,9	152,6
4	20	8,0	ST	*	*
5	22	5,0	ST	22,3	124,0
6	22	6,0	ST	21,7	136,4
7	22	7,0	ST	21,9	151,9
8	22	8,0	ST	21,8	165,7
9	24	5,0	ST	21,5	124
10	24	6,0	ST	22,1	139,8
11	24	7,0	ST	22,1	151,5
12	24	8,0	ST	23,1	166,4
13	26	5,0	ST	23,6	131,8
14	26	6,0	ST	23,2	146,4
15	26	7,0	ST	23,3	154,2
16	26	8,0	ST	23,7	165,7
17	20	5,0	TT	20,1	124,8
18	20	6,0	TT	19,9	137,8
19	20	7,0	TT	20,3	151,6
20	20	8,0	TT	20,4	165,1
21	22	5,0	TT	21,4	126,7
22	22	6,0	TT	21,5	142,3
23	22	7,0	TT	21,4	157,1
24	22	8,0	TT	21,3	165,6
25	24	5,0	TT	22,5	125,0
26	24	6,0	TT	22,0	140,9
27	24	7,0	TT	21,7	155,4
28	24	8,0	TT	21,6	167
29	26	5,0	TT	23,6	129,3
30	26	6,0	TT	23,2	145,8
31	26	7,0	TT	23	159,6
32	26	8,0	TT	22,9	169,3

Onde:

ST = Simples deposição sem tecimento

TT = Simples deposição com tecimento triangular

Uef = Tensão Eficaz

Ief = Corrente Eficaz

* = não soldou

Tabela 19 - Parâmetros de soldagem para os ensaios preliminares com $V_s = 0,4$ m/min.

Ensaio	Ur (V)	Valim (m/min)	Tecimento	Uef (V)	Ief (A)
33	20	5,0	ST	20,1	133,3
34	20	6,0	ST	19,3	134,2
35	20	7,0	ST	19,1	150,5
36	20	8,0	ST	19,6	164,2
37	22	5,0	ST	20,9	126,3
38	22	6,0	ST	20,3	141
39	22	7,0	ST	20,1	149,2
40	22	8,0	ST	20,1	163,5
41	24	5,0	ST	22,5	130,8
42	24	6,0	ST	21,7	142,1
43	24	7,0	ST	21,5	151,9
44	24	8,0	ST	21,4	166,3
45	26	5,0	ST	23,7	131,9
46	26	6,0	ST	21,4	145,4
47	26	7,0	ST	21,3	157,3
48	26	8,0	ST	22,8	173,6
49	20	5,0	TT	19,2	125,3
50	20	6,0	TT	19,1	155,9
51	20	7,0	TT	19,2	156,8
52	20	8,0	TT	19,3	163,2
53	22	5,0	TT	20,8	125,7
54	22	6,0	TT	20,2	141,3
55	22	7,0	TT	19,1	154,6
56	22	8,0	TT	20,4	168,1
57	24	5,0	TT	21,6	127,9
58	24	6,0	TT	21,5	143,3
59	24	7,0	TT	20,4	149,6
60	24	8,0	TT	21,3	165,4
61	26	5,0	TT	22,2	128,1
62	26	6,0	TT	23,2	145,4
63	26	7,0	TT	23,0	169,7
64	26	8,0	TT	21,5	169,9

A aquisição dos sinais de tensão e de corrente foi realizada em 12 bits, a uma taxa de 9,6 kHz, e utilizou-se um tempo total de aquisição de 5 segundos para cada ensaio. O início da aquisição dos dados de cada ensaio ocorreu aproximadamente 2 segundos após a abertura dos arcos. Este procedimento foi adotado com objetivo de adquirir os dados no momento em que o arco estivesse mais estabilizado.

Após a realização das soldagens, os corpos de prova foram submetidos a uma preparação metalográfica para obtenção das características geométricas (largura, reforço, penetração, Ad, Af, diluição e razão R/L).

b) Preparação metalográfica e medição das características geométricas

Para a preparação metalográfica e posterior medição das características geométricas dos cordões de solda, foi retirada uma amostra com 10 mm de largura da região central do cordão de solda.

A preparação das amostras consistiu em lixar usando lixas de granulação de 80, 100, 220, 320, 400, 600 e 1200. Após o lixamento foi feito um polimento com pasta de diamante de 3 μm em uma máquina politriz e, por fim, foi realizado um ataque químico com Nital 2% durante 20 s, para revelação do perfil geométrico do cordão de solda.

c) Resultados

Os resultados dos ensaios referentes a esta etapa encontram-se descritos de forma mais detalhada no capítulo seguinte.

4.3.2 Etapa 2 - Ensaios definitivos

Esta etapa foi dividida em seis atividades básicas:

- Planejamento do experimento: Escolha dos fatores de controle e de seus níveis
- Seleção das variáveis respostas
- Realização das soldagens
- Preparação metalográfica e medição das características geométricas
- Realização dos testes de confirmação
- Determinação dos custos de soldagem

a) Planejamento do experimento

Esta atividade consistiu em planejar o número de ensaios a serem realizados, onde optou-se pelo uso do método Taguchi com a finalidade de reduzir a quantidade de ensaios em relação ao fatorial completo utilizado na Etapa 1.

Então, com base nos ensaios preliminares, foram identificados os fatores de controle e seus níveis mais influentes para obtenção da transferência metálica por curto-circuito, bem como os fatores capazes de influenciar de forma significativa as características geométricas

dos cordões de solda. Assim foi montada a primeira matriz ortogonal L9 denominada neste trabalho de “L9-1”, cujos fatores de controle e seus respectivos níveis serão descritos a seguir:

- Tensão de referência (Ur)

A escolha deste parâmetro como fator de controle se deve à grande importância do comprimento do arco na estabilidade e no tipo da transferência metálica. Então, para avaliar o efeito da tensão de referência com a fonte de soldagem operando no modo de tensão constante e com transferência metálica por curto-circuito, foram selecionados três valores: 20 V, 22 V e 24 V, que correspondem aos Níveis 1, 2 e 3 deste fator de controle respectivamente (Tabela 20 e Tabela 21).

- Técnica da tocha (T.T)

Este parâmetro foi escolhido como fator de controle devido a sua influência significativa sobre o perfil geométrico do cordão de solda. Assim, para avaliar o efeito deste fator de controle (Tabela 20), que corresponde ao ângulo de inclinação da tocha em relação a um eixo perpendicular ao corpo de prova, contido num plano vertical que passa pelo eixo longitudinal do corpo de prova, foram adotados três níveis, no qual o Nível 1 é a tocha com uma inclinação de 0° ou Normal, o Nível 2 é tocha com inclinação de 15° empurrando, e o Nível 3 é tocha com inclinação de 15° puxando. A Figura 13 ilustra estas três posições descritas acima.

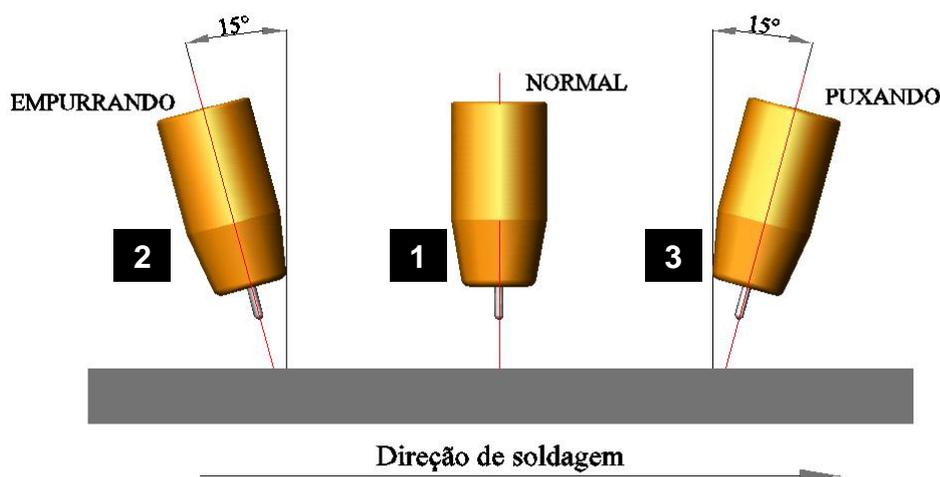


Figura 13 - Posições da tocha.

- Tipo de tecimento (Tecimento)

O tipo de tecimento foi escolhido por ter afetado significativamente todas as características geométricas analisadas na Etapa 1, indicando que ele tem forte influência no

formato do perfil geométrico do cordão de solda. Para avaliar o efeito do tecimento sobre as variáveis respostas, foram adotados três níveis para este fator de controle: soldagem sem tecimento, soldagem com tecimento triangular (Figura 14) e soldagem com tecimento duplo oito (Figura 15), que são os Níveis 1, 2 e 3 respectivamente (Tabela 20).

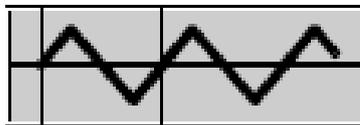


Figura 14 - Tecimento triangular.

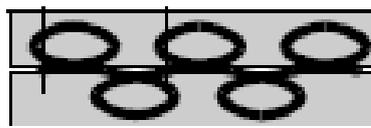


Figura 15 - Tecimento em duplo oito.

- Velocidade de soldagem (V_s)

Este fator foi escolhido, pois sua variação é capaz de modificar a geometria do cordão de solda. Para avaliar a influência deste fator de controle, foram utilizadas três velocidades de soldagem diferentes: 0,2 m/min, 0,3 m/min e 0,4 m/min representados pelos Níveis 1, 2 e 3 respectivamente (Tabela 20 e Tabela 21). Os quatro fatores de controle, bem como seus três níveis escolhidos para realização dos ensaios da matriz L9-1 podem ser vistos conjuntamente na Tabela 20.

Tabela 20 - Fatores de controle e seus níveis para a matriz L9-1.

Fatores de Controle	Nível		
	1	2	3
Ur (V)	20	22	24
T.T	Normal	Empurrando	Puxando
Tecimento	Sem tecimento (ST)	Triangular (TT)	Duplo 8 (D8)
V_s (m/min)	0,2	0,3	0,4

Após a execução da matriz ortogonal L9-1 foi constatada a necessidade de investigar o comportamento de novos fatores de controle ainda não investigados. Assim foi montada uma segunda matriz ortogonal L9, denominada de “L9-2”. Nesta matriz, a tensão de referência (U_r) e a velocidade de soldagem (V_s) foram mantidas como fatores de controle (Tabela 21) devido às suas influências na transferência metálica, no cálculo da energia de soldagem e na geometria do cordão de solda. Já os novos fatores de controle utilizados nos ensaios da matriz L9-2 encontram-se descritos abaixo:

- Material de adição (Liga)

A escolha do material de adição como fator de controle é justificada pelo fato de que as ligas AWS ERNiCrMo-3 e AWS ERNiCrMo-4 foram sugeridas pelo setor de engenharia de soldagem do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello – CENPES/PETROBRAS em conjunto com o corpo técnico do Engesoda (UFC) e a liga AWS ERNiCrMo-14 foi sugerida pelo corpo técnico do Engesolda por se tratar de uma evolução da liga AWS ERNiCrMo-4 devido ao acréscimo de cromo, que proporciona uma maior resistência à corrosão generalizada, por frestas e por pites. Outros trabalhos desenvolvidos (MIRANDA, 2008) e em desenvolvimento no Engesolda (teses de doutorado em andamento) apontam que foram obtidos perfis geométricos distintos quando diferentes ligas foram soldadas com os mesmos parâmetros. Então, com o intuito de verificar se o material de adição teria alguma influência sobre as variáveis respostas, foram utilizados três arames eletrodos para este fator de controle: ERNiCrMo-3 ou 625, ERNiCrMo-14 ou 686 e ERNiCrMo-4 ou C-276, que são os Níveis 1, 2 e 3 respectivamente (Tabela 21).

- Gás de proteção (Gás)

Este parâmetro foi adotado como fator de controle por causa de sua forte influência sobre a transferência metálica e sobre as características geométricas dos cordões de solda. Assim com o intuito de avaliar o efeito deste fator de controle sobre as variáveis respostas, foram adotados neste trabalho três gases de proteção diferentes: 100% Ar, 70% Ar + 30% He e 99,97% Ar + 0,03% NO, os quais correspondem aos Níveis 1, 2 e 3 respectivamente (Tabela 21). Os quatro fatores de controle, bem como seus três níveis escolhidos para realização dos ensaios da matriz L9-2, podem ser vistos conjuntamente na Tabela 21.

Tabela 21 - Fatores de controle e seus níveis para a matriz L9-2.

Fatores de Controle	Nível		
	1	2	3
Liga	625	686	C-276
Gás	100% Ar	70% Ar + 30% He	99,97% Ar + 0,03% NO
Vs (m/min)	0,2	0,3	0,4
Ur (V)	20	22	24

b) Variáveis respostas (critérios de qualidade)

Nos experimentos realizados nas duas matrizes, as variáveis respostas adotadas como critério de qualidade para julgar se a combinação dos níveis dos fatores de controle é aceitável são variáveis fundamentais para a soldagem de revestimento e serão justificadas a seguir:

- A razão entre o reforço e a largura (R/L)

Esta variável resposta foi selecionada como critério de qualidade pelo fato de R/L representar o grau de convexidade do cordão de solda. Altos valores de R/L proporcionam concentrações de tensão no pé do cordão de solda e favorecem a ocorrência de defeitos, como a falta de fusão indesejáveis na soldagem de revestimento, por isso este critério é do tipo “menor é melhor”.

- A diluição (D)

Sua escolha como critério de qualidade se deve ao fato de que uma das aplicações das soldagens de revestimento é a proteção contra corrosão, por isso é importante controlar a participação do metal de base na composição do metal de solda (diluição elevada prejudica a resistência à corrosão do revestimento), o que torna este critério do tipo “menor é melhor”. O valor máximo de diluição considerado admissível foi 10% para esta etapa, já que a norma ISO 10423, adotada pela Petrobras para as soldagens de revestimento em equipamentos com revestimentos metálicos, exige o teor de ferro máximo de 5 a 10% (ISO 10423, 2003).

- O produto da diluição pela razão R/L (DxR/L)

Deve haver uma solução de compromisso entre os dois critérios de qualidade anteriores de tal forma que atenda às necessidades em questão. Assim, a variável resposta DxR/L também foi escolhida como critério de qualidade e também é do tipo “menor é melhor”. O valor máximo aceitável foi de 0,5 para a razão R/L nesta etapa, pois, nos ensaios preliminares, valores acima deste proporcionaram cordões de solda com excessiva convexidade.

c) Realização das soldagens

As soldagens MIG/MAG foram realizadas na posição plana por simples deposição sobre chapas de aço ASTM 516 Gr60 com dimensões de 200 x 50 x 12,7 mm, estando o eletrodo na polaridade positiva e com uma DBCP de 20 mm. Foram mantidas constantes a vazão do gás de proteção em 20 L/min e a velocidade de alimentação em 6,0 m/min.

Na Tabela 22 e na Tabela 23, observam-se as combinações dos níveis dos fatores de controle sugeridos pelo método Taguchi e, nestas tabelas, ainda encontram-se descritos a sequência de execução, os parâmetros de soldagem e os consumíveis para a realização dos ensaios referentes a esta etapa do trabalho. Vale lembrar que, em todos os ensaios relativos à matriz L9-1, utilizou-se o argônio puro como gás de proteção e a liga 625 como material de adição. Todos os resultados e análises realizadas com base nestes ensaios serão apresentados com mais detalhes no capítulo 6.

Tabela 22 - Ensaios realizados com a matriz L9-1.

Ensaio	Tensão de referência	Técnica da Tocha	Tipo de tecimento	Velocidade de soldagem (m/min)
R01	1 (20V)	1 (Normal)	1 (Sem Tecimento)	1 (0,2)
R02	1 (20V)	2 (Empurrando)	2 (Tec.Triangular)	2 (0,3)
R03	1 (20V)	3 (Puxando)	3 (Duplo oito)	3 (0,4)
R04	2 (22V)	1 (Normal)	2 (Tec.Triangular)	3 (0,4)
R05	2 (22V)	2 (Empurrando)	3 (Duplo oito)	1 (0,2)
R06	2 (22V)	3 (Puxando)	1 (Sem Tecimento)	2 (0,3)
R07	3 (24V)	1 (Normal)	3 (Duplo oito)	2 (0,3)
R08	3 (24V)	2 (Empurrando)	1 (Sem Tecimento)	3 (0,4)
R09	3 (24V)	3 (Puxando)	2 (Tec.Triangular)	1 (0,2)

Tabela 23 - Ensaios realizados com a matriz L9-2.

Ensaio	Liga	Gás de proteção	Velocidade de soldagem (m/min)	Tensão de referência
R10	1 (625)	1 (100% Ar)	1 (0,2)	1 (20V)
R11	1 (625)	2 (70% Ar+30% He)	2 (0,3)	2 (22V)
R12	1 (625)	3 (99,97% Ar + 0,03% NO)	3 (0,4)	3 (24V)
R13	2 (686)	1 (100% Ar)	2 (0,3)	3 (24V)
R14	2 (686)	2 (70% Ar+30% He)	3 (0,4)	1 (20V)
R15	2 (686)	3 (99,97% Ar + 0,03% NO)	1 (0,2)	2 (22V)
R16	3 (C-276)	1 (100% Ar)	3 (0,4)	2 (22V)
R17	3 (C-276)	2 (70% Ar+30% He)	1 (0,2)	3 (24V)
R18	3 (C-276)	3 (99,97% Ar + 0,03% NO)	2 (0,3)	1 (20V)

d) Preparação metalográfica e medição das características geométricas:

Nesta etapa, foram retiradas duas amostras com 10 mm de largura para análise das características geométricas dos cordões de solda. A extração da 1ª amostra se deu a 30 mm do início do cordão de solda, e a extração da 2ª amostra se deu a 30 mm do final do cordão de solda de cada corpo de prova. A Figura 16 ilustra as regiões de onde foram extraídas as amostras.

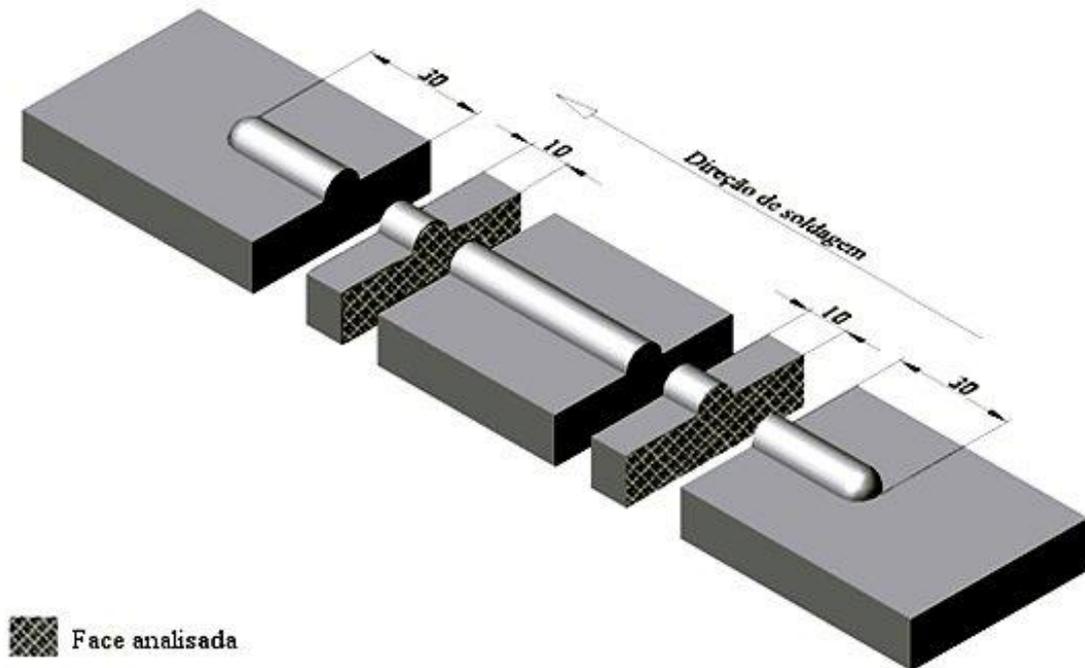


Figura 16 - Extração das amostras dos corpos de prova.

As amostras, depois de cortadas, foram lixadas (da granulação 200 até a granulação 1200), polidas com pasta de diamante de 3 μm e, por fim, foram atacadas quimicamente com Nital 2% durante 20 s, para revelar o perfil geométrico.

Após a revelação do perfil geométrico, as amostras foram fotografadas para medição da largura, reforço, penetração e diluição, através de software de análise de imagens. A diluição foi calculada, através da relação entre as áreas adicionada e diluída, conforme a Equação 1 mostrada na página 39.

e) Testes de confirmação

Após a realização dos ensaios, ou seja, na etapa final da análise dos resultados obtidos tanto para matriz L9-1 quanto para matriz L9-2, as conclusões que serão adquiridas indicarão quais os fatores de controle que influenciaram significativamente as variáveis respostas analisadas e quais as condições ótimas estabelecidas para estes fatores influentes. A partir destas conclusões, foram realizados alguns ensaios chamados de testes de confirmação, com o

intuito de confirmar a validade da previsão das condições ótimas estabelecidas pelo método Taguchi. Assim, os valores da diluição, da razão R/L e do DxR/L obtidos através do método Taguchi serão considerados válidos caso estejam dentro de um intervalo de confiança calculado com base nos valores previstos para estes critérios de qualidade.

f) Custos de soldagem

Esta atividade consistirá em calcular e comparar os custos associados a cada um dos ensaios pertencentes as matrizes L9-1 e L9-2, bem como os custos associados aos ensaios previstos pela combinação ótima para realização das soldagens de revestimento.

Nesta atividade, o reforço foi utilizado para julgar se é necessário ou não a soldagem de uma segunda camada de revestimento, pois os revestimentos internos empregados em tubulações para o setor de petróleo e gás natural exigem um reforço líquido de 3 mm, por isso deve-se obter um reforço bruto o mais próximo possível de 5 mm afim de permitir uma usinagem posterior que resulte neste valor estipulado para o reforço líquido (PETROBRAS N-1707, 1999).

Assim, caso seja necessário o uso de duas camadas para atender ao requisito mínimo de reforço, o custo torna-se relevante para auxiliar o método Taguchi na escolha dos melhores parâmetros de soldagem para a obtenção de revestimentos.

Então, como forma de comparar os gastos despendidos em cada um dos ensaios foi utilizado o custo direto total da soldagem de um revestimento com 55 mm de largura e 190 mm de comprimento, utilizando uma sobreposição de 50%. Para o cálculo deste custo, foram necessárias três variáveis: a taxa de deposição (TD), a taxa de fusão (TF) e a eficiência de deposição (ED), que foram determinadas com base nas diferenças de peso dos corpos de prova das matrizes L9-1 e L9-2 antes e após as soldagens, e nas velocidades de soldagem e de alimentação do arame-eletrodo. As diferenças de pesos foram medidas com uma balança eletrônica com resolução de 0,1 g.

4.3.3 Etapa 3 - Soldagem de revestimento

Esta etapa teve como objetivo verificar se os resultados obtidos nas etapas anteriores serão capazes de gerar revestimentos isentos de defeitos. Assim, com base numa análise conjunta dos resultados dos ensaios definitivos e nos custos de soldagem, foram escolhidas algumas condições para aplicação por soldagem do revestimento sobre uma chapa de aço ASTM 516 Gr.60 com dimensões de 200 x 150 x 12,7 mm.

O revestimento foi realizado com o arame eletrodo na polaridade positiva, o qual foi depositado na posição plana. Utilizou-se uma sobreposição dos passes de 50% em relação à largura do primeiro cordão (Figura 17) tendo o cuidado de manter a temperatura de interpasse menor ou igual à 100°C. Foram mantidas constantes a vazão do gás de proteção em 20 L/min, a velocidade de alimentação do arame em 6,0 m/min e a DBCP em 20 mm.

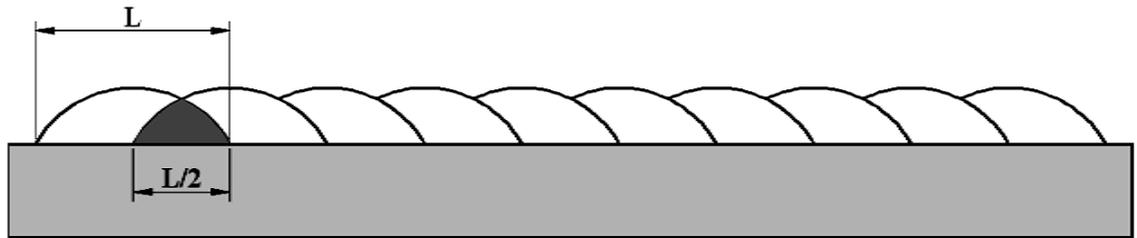


Figura 17 - Ilustração do nível de sobreposição entre os cordões.

Após a soldagem do revestimento, foi extraída uma amostra com 10 mm de largura do centro do corpo de prova (Figura 18) para medição de algumas de suas características geométricas (largura, diluição e reforço).

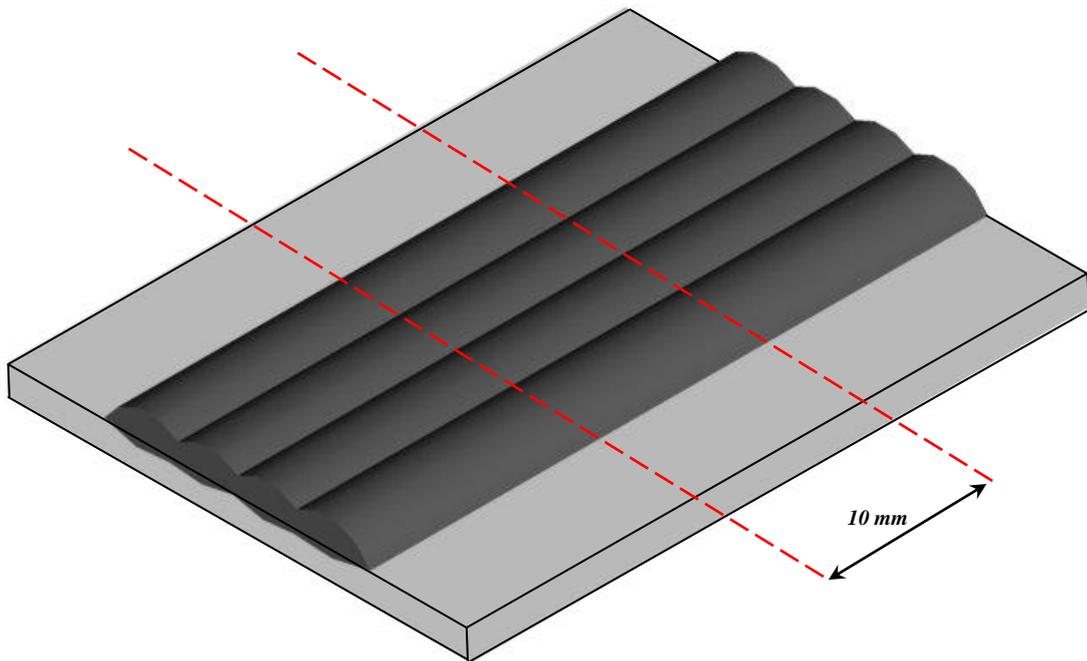


Figura 18 - Extração dos corpos de prova para medição das variáveis respostas.

Os critérios usados para aprovação do revestimento obtido foram: (i) o acabamento superficial, (ii) o reforço (exigência do reforço bruto mínimo de 5 mm pela norma PETROBRAS N -1707) e (iii) ausência de defeitos visíveis (trincas, falta de fusão e vazios entre os cordões).

CAPÍTULO V

ENSAIOS PRELIMINARES

5. Etapa 1 - Ensaios preliminares

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados na primeira etapa do trabalho, cujos parâmetros de soldagem, materiais empregados e sequência dos ensaios foram descritos detalhadamente na metodologia.

5.1 Aspecto superficial

A Figura 19 e a Figura 20 exemplificam os aspectos superficiais das soldagens obtidos para as soldagens correspondentes a esta etapa.

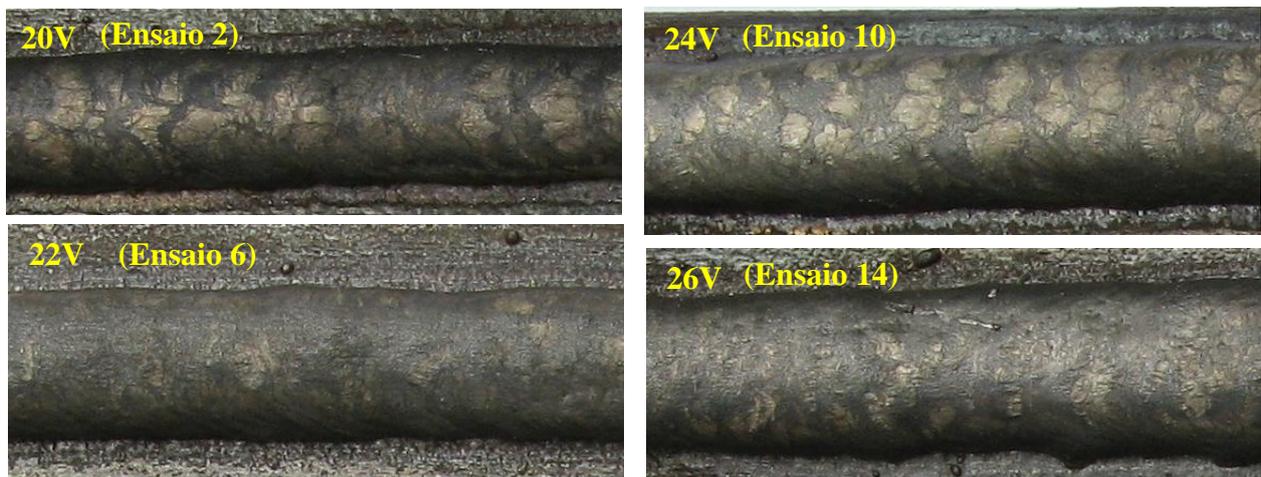


Figura 19 - Aspecto superficial das soldas em simples deposição sem tecimento.

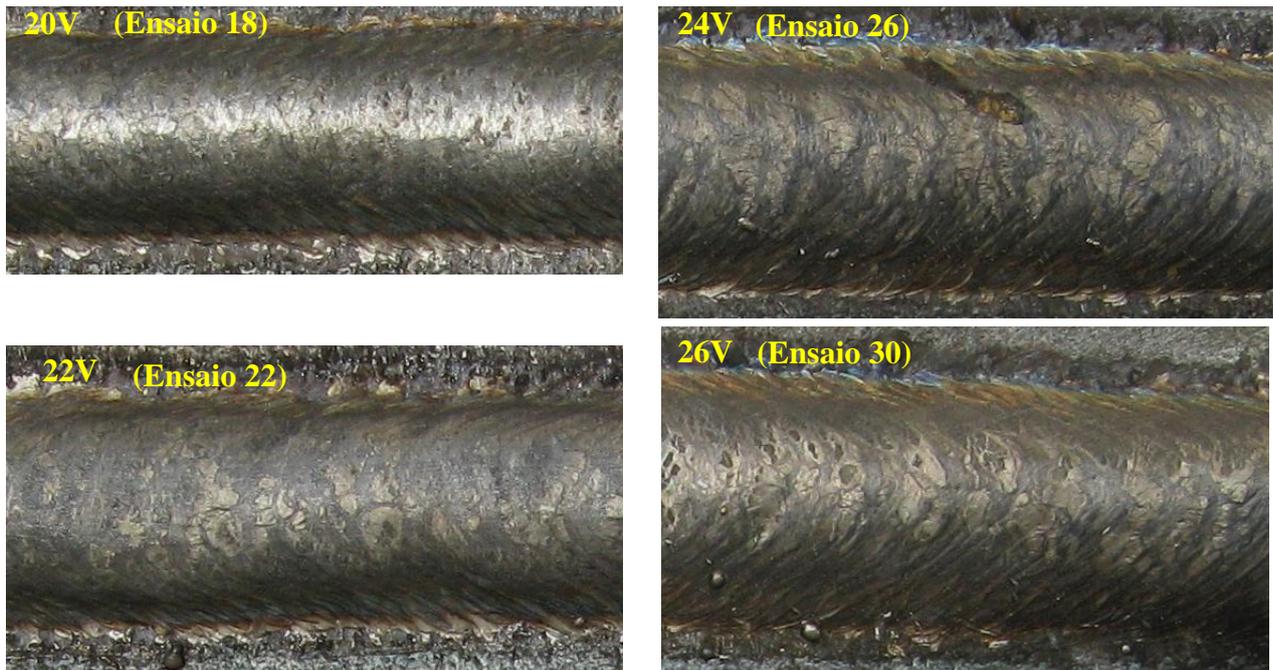


Figura 20 - Aspecto superficial das soldas em simples deposição com tecimento triangular.

Observa-se, nestas soldagens, uma pequena quantidade de respingos para os cordões de solda com Ur de 22 e 26 V. Já nos cordões de solda com Ur de 20 e 24 V, não foi verificada a presença de respingos para todas as velocidades de alimentação e velocidades de soldagens. O aspecto superficial das soldagens em simples deposição com argônio como gás de proteção é bem satisfatório. Somente no caso da tensão de referência de 26 V, observa-se uma maior quantidade de respingos e irregularidades na largura do cordão de solda, fato que se deve à transferência metálica mista do tipo globular/curto-circuito. Devido ao elevado valor desta tensão de referência, a transferência metálica não foi realizada em sua totalidade pelo curto-circuito, que apresentou uma frequência média de curto muito baixa ($\approx 12,5$ Hz), como mostra a Figura 21 e leva a crer que também haja a presença de uma transferência metálica globular (gotas com diâmetro médio em torno de 2,5 mm).

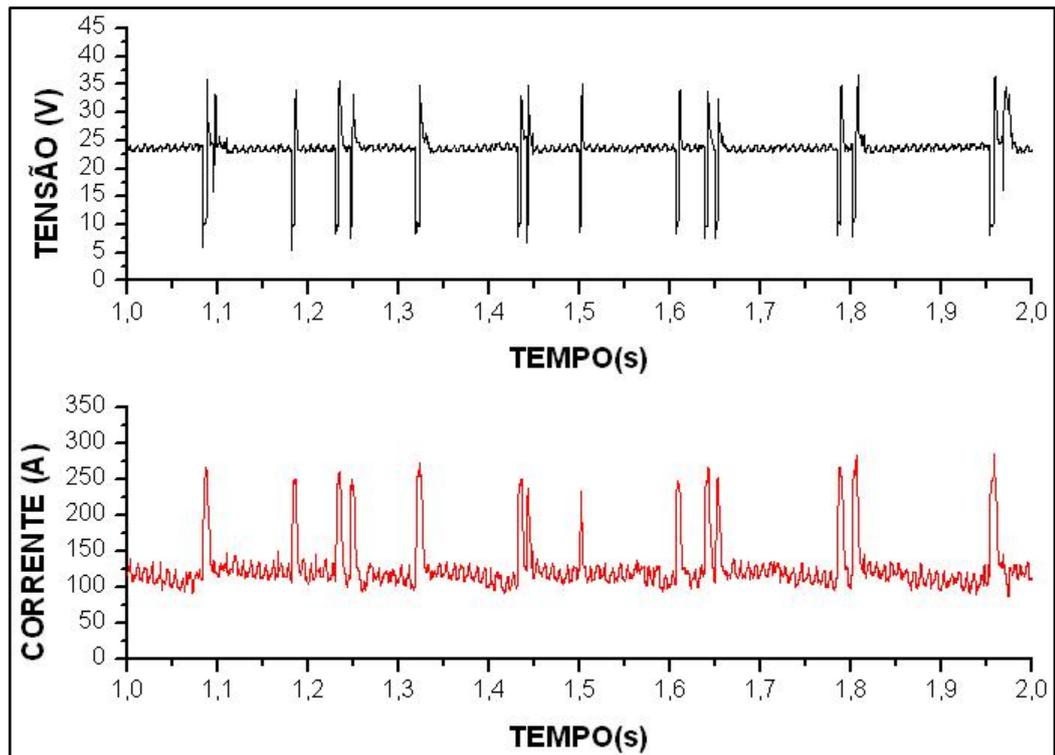


Figura 21 - Oscilograma de tensão e corrente: $U_r=26$ V; $V_{alim}=5$ m/min; $V_s=0,2$ m/min; ST (Ensaio 13)

5.2 Características geométricas

A Tabela 24 e a Tabela 25 mostram os valores das características geométricas dos cordões de solda: largura (L), reforço (R), penetração (P), diluição (D), razão reforço/largura (R/L), área depositada (A_d) e área fundida (A_f), bem como os valores de algumas variáveis respostas importantes: energia corrigida (E_c), percentual de arco aberto (%AA) e número de curto-circuito (N_{cc}) para as soldas gradadas pelo emprego do curto-circuito em tensão constante e argônio puro como gás de proteção.

Tabela 24 - Valores das características geométricas, da energia corrigida, do percentual de arco aberto e do número de curtos-circuitos para os ensaios com $V_s = 0,2$ m/min.

Ensaio	L (mm)	R (mm)	P (mm)	R/L	D (%)	Ad (mm ²)	Af (mm ²)	Ec (KJ/cm)	%AA	Ncc
1	7,9	3,5	1,0	0,5	13,6	18,6	2,9	7,6	89,5	119
2	8,8	4,3	1,2	0,5	10,9	29,7	3,6	8,2	83,2	192
3	8,4	4,7	1,1	0,6	9,0	34,4	3,4	9,4	76,5	270
4	Não soldou									
5	9,0	3,7	1,0	0,4	12,0	25,5	3,5	8,0	88,9	117
6	7,7	4,5	1,2	0,6	9,6	31,0	3,3	8,5	85,0	173
7	7,6	4,3	1,2	0,6	10,4	29,8	3,5	9,6	80,1	218
8	8,2	4,9	0,9	0,6	6,5	37,6	2,6	10,7	72,9	292
9	9,3	3,8	0,5	0,4	4,1	26,4	1,1	7,8	90,7	110
10	9,5	4,4	0,9	0,5	6,1	34,7	2,2	8,9	87,4	150
11	9,7	4,4	1,3	0,5	9,3	35,9	3,7	10,7	72,5	322
12	9,1	4,2	1,2	0,5	9,5	26,4	3,3	11,2	72,8	336
13	8,5	3,5	0,7	0,4	9,5	22,9	2,4	9,0	92,5	80
14	9,9	3,7	1,2	0,4	13,6	26,6	4,2	9,9	89,1	115
15	9,2	3,9	0,9	0,4	8,0	30,1	2,6	10,3	84,2	192
16	10,0	4,4	1,0	0,4	8,5	37,2	3,5	11,4	80,6	244
17	12,0	2,9	0,5	0,2	10,7	20,7	2,5	7,1	92,5	71
18	13,6	3,7	0,4	0,3	5,0	31,8	1,7	7,8	86,0	151
19	12,5	3,9	0,3	0,3	2,1	34,5	0,8	8,9	80,3	221
20	14,7	4,2	0,4	0,3	6,7	38,3	2,7	9,8	73,4	312
21	14,0	2,8	0,5	0,2	10,5	23,6	2,8	7,2	90,2	75
22	12,9	3,8	0,4	0,3	5,8	30,7	1,9	7,8	91,3	86
23	13,4	3,4	0,5	0,3	6,9	31,6	2,3	9,5	86,5	131
24	12,8	3,7	0,3	0,3	3,9	33,4	1,4	10,2	79,9	214
25	14,1	2,9	0,4	0,2	10,0	24,0	2,7	8,2	90,9	64
26	15,2	3,3	0,5	0,2	8,9	31,9	3,1	9,0	90,5	111
27	13,9	3,0	0,4	0,2	9,2	28,6	2,9	9,8	81,9	239
28	14,5	3,5	0,5	0,2	6,3	34,2	2,3	10,5	76,0	293
29	14,4	2,7	0,6	0,2	17,0	23,0	4,7	9,0	93,4	55
30	14,6	3,1	0,5	0,2	8,5	29,7	2,8	9,9	92,4	60
31	14,8	3,4	0,4	0,2	9,0	33,0	3,3	10,8	86,3	63
32	15,9	3,8	0,4	0,2	5,8	42,3	2,6	11,4	80,1	67

Tabela 25 - Valores das características geométricas, da energia corrigida, do percentual de arco aberto e do número de curtos-circuitos para os ensaios com $V_s=0,4$ m/min.

Ensaio	L (mm)	R (mm)	P (mm)	R/L	D (%)	Ad (mm ²)	Af (mm ²)	Ec (KJ/cm)	%AA	Ncc
33	6,5	2,9	0,6	0,5	13,8	11,9	1,9	3,8	90,2	122
34	5,1	3,3	0,7	0,7	11,6	12,9	1,7	3,8	84,6	203
35	5,6	3,9	0,8	0,7	10,9	17,2	2,1	4,2	77,7	261
36	5,6	3,7	0,6	0,7	6,5	17,3	1,2	4,8	67,2	379
37	5,7	2,5	0,8	0,4	18,6	9,2	2,1	3,8	88,8	113
38	6,2	3,2	0,8	0,5	13,4	14,2	2,2	4,1	86,7	175
39	6,1	3,1	0,9	0,5	12,7	14,5	2,1	4,4	78,4	257
40	6,5	3,5	0,7	0,5	8,4	18,6	1,7	4,8	70,7	336
41	6,5	2,5	0,6	0,4	15,0	10,2	1,8	4,2	90,8	103
42	7,0	2,8	0,7	0,4	15,9	13,2	2,5	4,5	90,1	124
43	7,1	3,0	1,0	0,4	16,0	16,3	3,1	4,8	83,0	206
44	7,0	3,5	0,9	0,5	10,6	18,5	2,2	5,2	75,1	303
45	7,0	2,6	0,8	0,4	17,1	12,1	2,5	4,6	90,3	77
46	6,9	3,0	0,7	0,4	14,6	14,6	2,5	4,5	89,9	143
47	6,8	3,2	0,8	0,5	11,9	16,3	2,2	4,8	84,2	199
48	8,2	2,8	0,9	0,3	16,0	16,8	3,2	5,8	83,9	214
49	8,7	2,9	0,4	0,3	8,6	12,8	1,2	3,4	91,7	77
50	8,2	3,2	0,5	0,4	6,4	14,6	1,0	4,3	88,5	119
51	8,3	3,5	0,4	0,4	6,5	17,4	1,2	4,1	82,0	204
52	7,8	3,4	0,3	0,4	4,9	15,7	0,8	4,5	83,0	203
53	9,5	2,4	0,4	0,3	9,5	14,3	1,5	3,7	88,8	70
54	9,3	3,0	0,3	0,3	10,1	16,0	1,8	4,1	88,8	131
55	7,8	3,6	0,2	0,5	3,5	16,8	0,6	4,2	83,8	166
56	8,5	3,5	0,3	0,4	5,5	19,1	1,1	5,0	78,3	254
57	8,6	2,5	0,5	0,3	13,3	13,1	2,0	4,0	92,7	71
58	9,7	2,8	0,5	0,3	11,8	15,7	2,1	4,5	88,6	125
59	9,7	3,2	0,5	0,3	14,7	19,1	3,3	4,8	81,3	144
60	8,8	3,2	0,4	0,4	9,7	17,8	1,9	5,2	80,0	266
61	8,7	2,6	0,4	0,3	11,7	12,8	1,7	4,1	93,1	58
62	9,6	2,3	0,5	0,2	15,8	13,3	2,5	4,9	93,8	61
63	10,0	2,8	0,3	0,3	15,4	17,0	3,1	5,8	88,6	65
64	9,0	3,0	0,5	0,3	15,7	17,2	3,2	5,4	83,2	67

5.3 Análise de variância no fatorial completo

De posse dos resultados obtidos na Tabela 24 e na Tabela 25, foi realizada a análise estatística de variância, com a finalidade de observar-se a influência dos fatores de controle sobre as características geométricas dos cordões de solda e sobre as variáveis auxiliares (Ec,

%AA e Ncc). Os valores dos níveis de significância “ α ”, calculados a partir das análises feitas, estão apresentados na Tabela 26. Níveis de significância menores que 0,05 (valores sublinhados e em negrito nas tabelas) indicam efeitos estatisticamente significativos, ou seja, há uma probabilidade de acerto de 95% em se admitir que determinado fator de controle esteja influenciando as variáveis de resposta analisadas.

Tabela 26 - Nível de significância dos fatores de controle sobre as variáveis respostas.

Fator de Controle	Nível de α							
	L	R	P	R/L	D	Ec	%AA	Ncc
Ur (V)	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,602	<u>0,000</u>	<u>0,001</u>	<u>0,000</u>	0,154	<u>0,000</u>
Valim (m/min)	0,358	<u>0,000</u>	<u>0,042</u>	<u>0,000</u>	<u>0,001</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
Vs (m/min)	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,072	0,285
Tecimento	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,001</u>	0,251	0,063	0,084

5.3.1 Influência da tensão de referência (Ur)

Conforme mostra a Tabela 26, a tensão de referência afetou significativamente todas as variáveis respostas analisadas, exceto a penetração. As Figuras 22, 23 e 24 mostram graficamente a influência de Ur sobre as variáveis respostas afetadas significativamente.

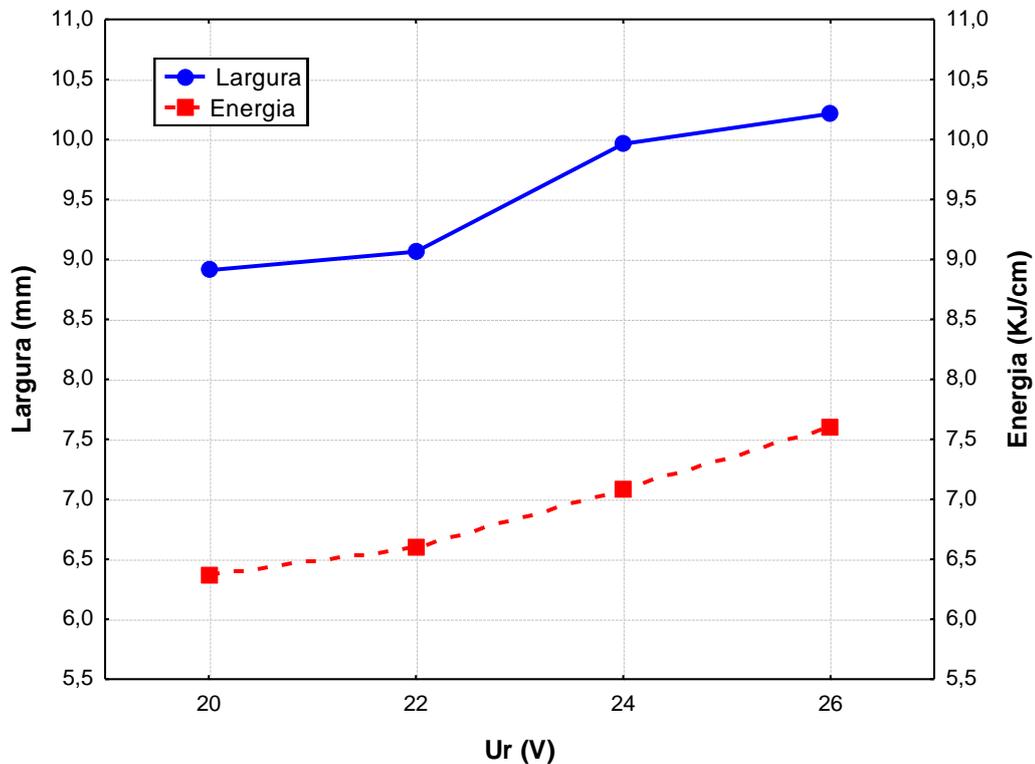


Figura 22 - Influência da tensão de referência sobre a largura do cordão de solda e sobre a energia corrigida.

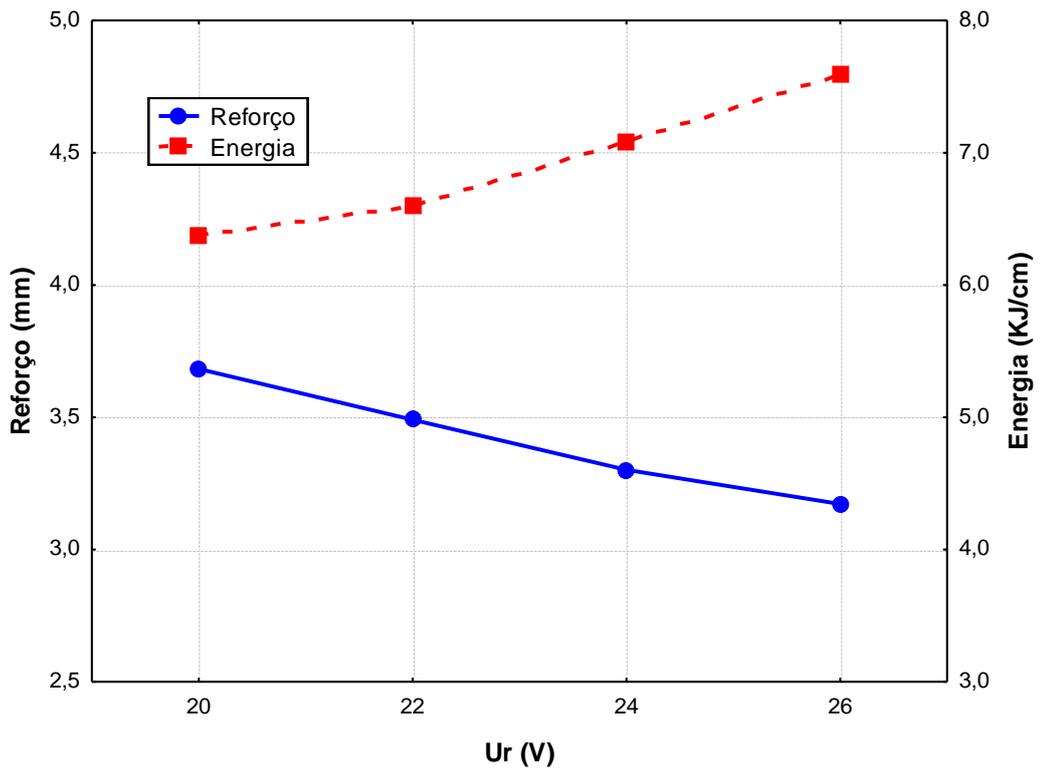


Figura 23 - Influência da tensão de referência sobre o reforço do cordão de solda e sobre a energia corrigida.

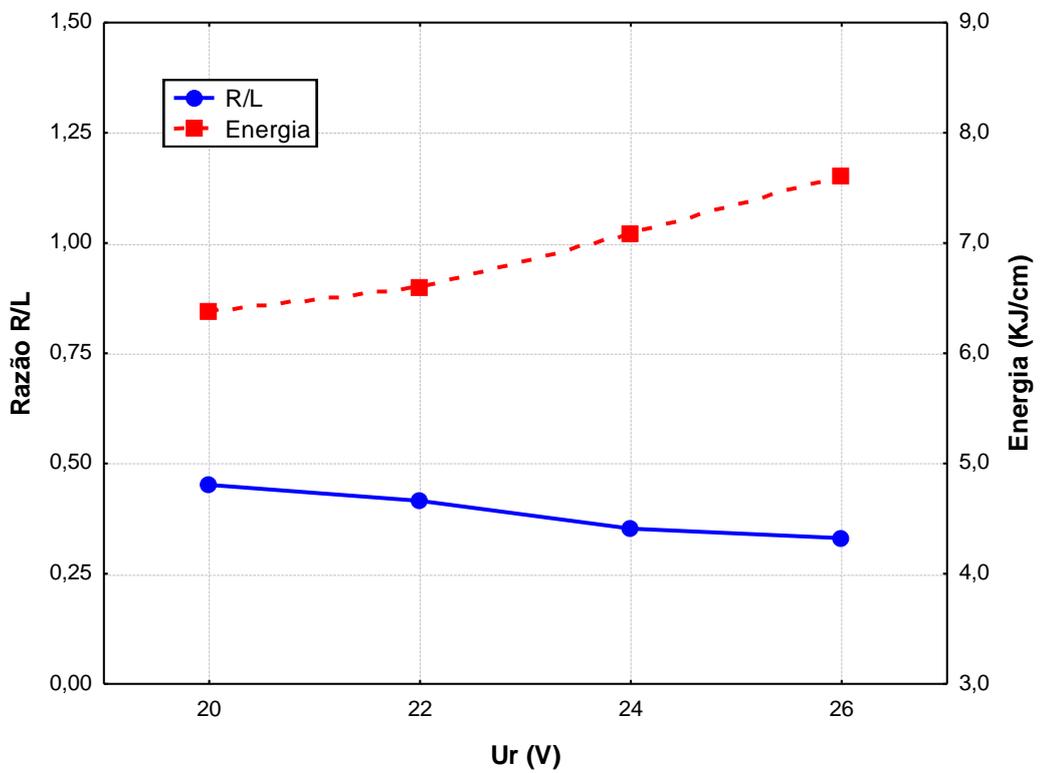


Figura 24 - Influência da tensão de referência sobre a razão R/L e sobre a energia corrigida.

Ao analisar as Figuras 22, 23 e 24, verifica-se que o aumento da tensão de referência proporciona um aumento nos valores da largura do cordão de solda e da energia, mas também promove uma redução nos valores do reforço e da razão R/L dos cordões de solda. Isto se deve ao fato de que, para maiores valores de tensão de referência, tem-se um maior comprimento de arco, que por sua vez, proporciona uma coluna de plasma mais ampla em sua extensão e o aumento da energia, por sua vez, acarreta numa maior quantidade de calor imposto a peça, promovendo uma melhor distribuição da poça de fusão sobre o metal de base. Com isso o cordão de solda torna-se mais largo e mais achatado, resultando num menor reforço e numa menor razão R/L (GOMES, 2006; SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

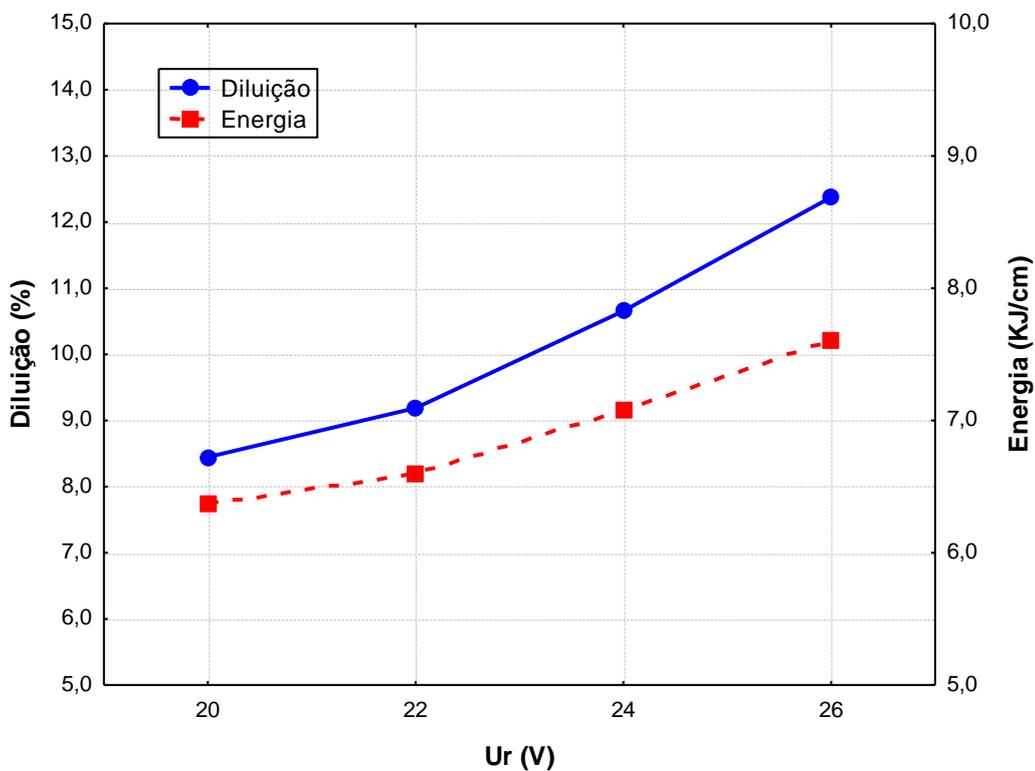


Figura 25 - Influência da tensão de referência sobre a diluição e sobre a energia corrigida.

Como pode ser visto na Figura 25, com o aumento na tensão de referência há um aumento nos valores de diluição dos cordões de solda, fato que se deve à maior tensão de referência proporcionar uma coluna de plasma mais larga e um aumento da energia (maior quantidade de calor imposta à peça), o que conforme já mencionado na análise da razão R/L resulta em cordões de solda mais largos e com um pequeno reforço, o qual não é capaz de atuar como uma barreira e não evita que a força do arco haja diretamente sobre a poça de fusão, ocasionado assim um aumento significativo ($\alpha = 0,001$) da área fundida do metal de

base (Figura 26), enquanto a área depositada do cordão de solda (Figura 27) não foi afetada significativamente ($\alpha = 0,969$), resultando em maiores valores de diluições.

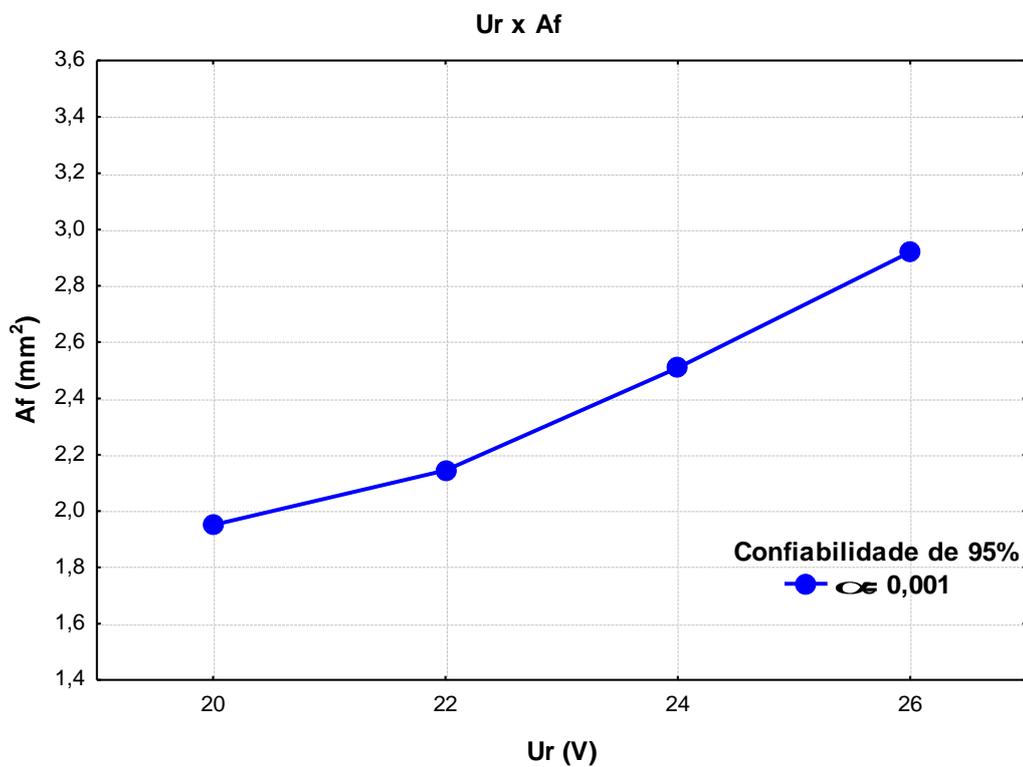


Figura 26 - Influência da tensão de referência sobre a área fundida.

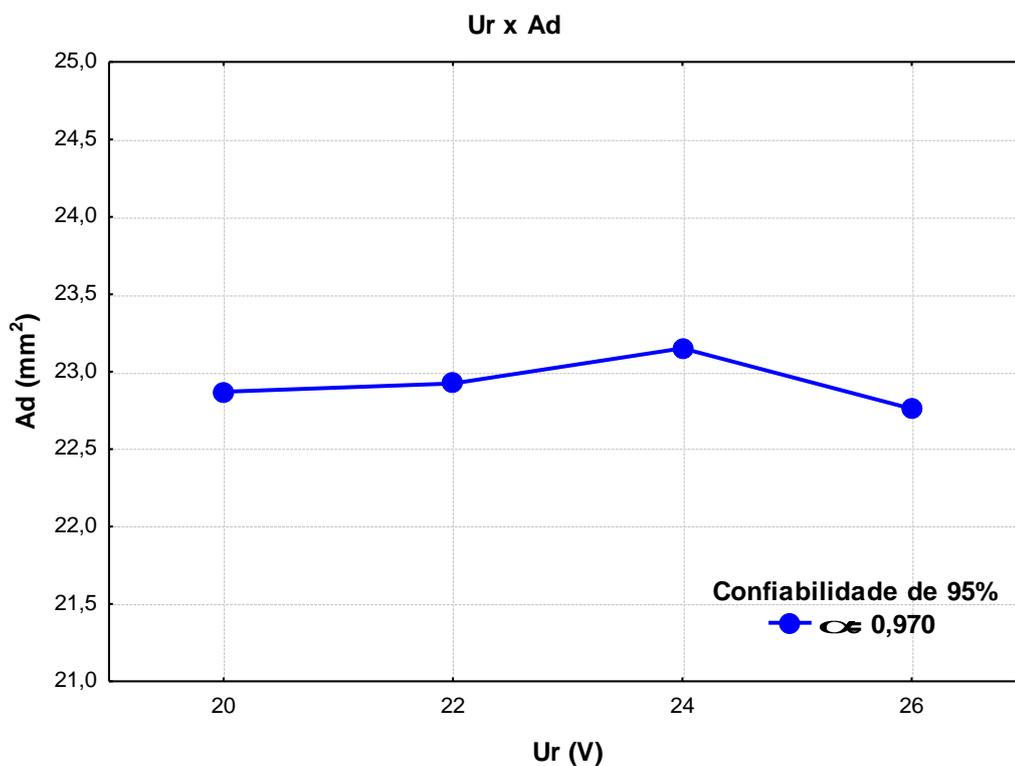


Figura 27 - Influência da tensão de referência sobre a área depositada.

5.3.2 Influência da velocidade de alimentação (Valim)

Com base na Tabela 26, verifica-se apenas a largura do cordão de solda não sofreu influência significativa deste fator de controle. As Figuras 28, 29, 30 e 31 mostram graficamente a influência da Valim sobre as variáveis respostas afetadas.

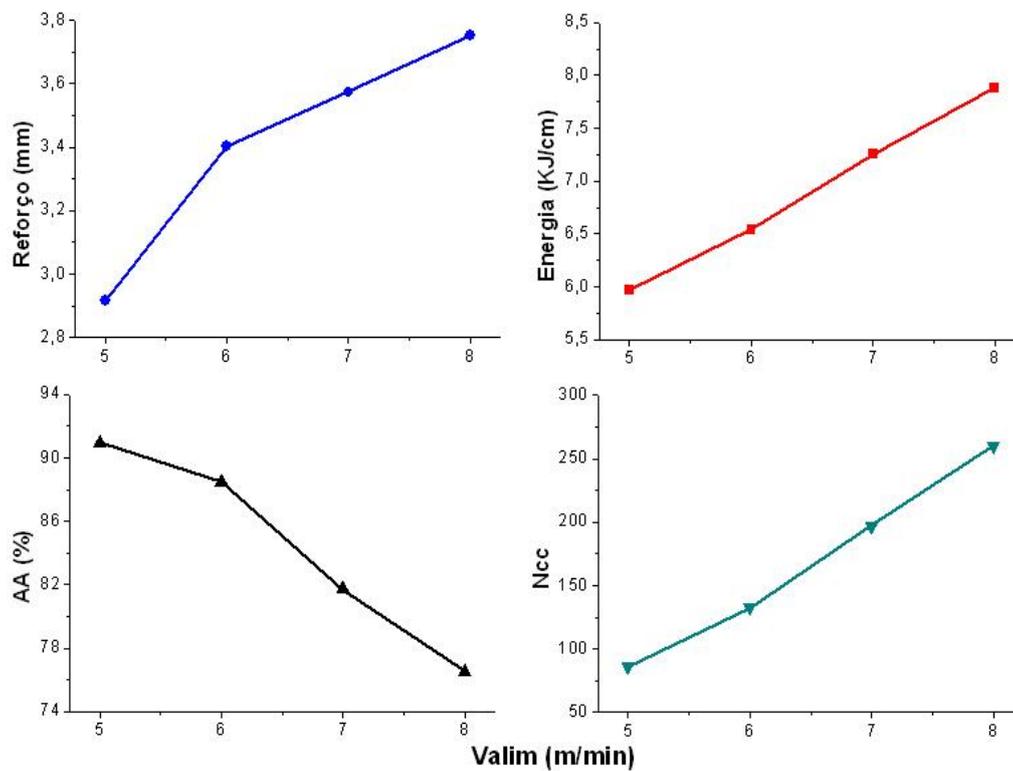


Figura 28 - Influência da Valim sobre: o reforço, a energia corrigida, o %AA e o Ncc.

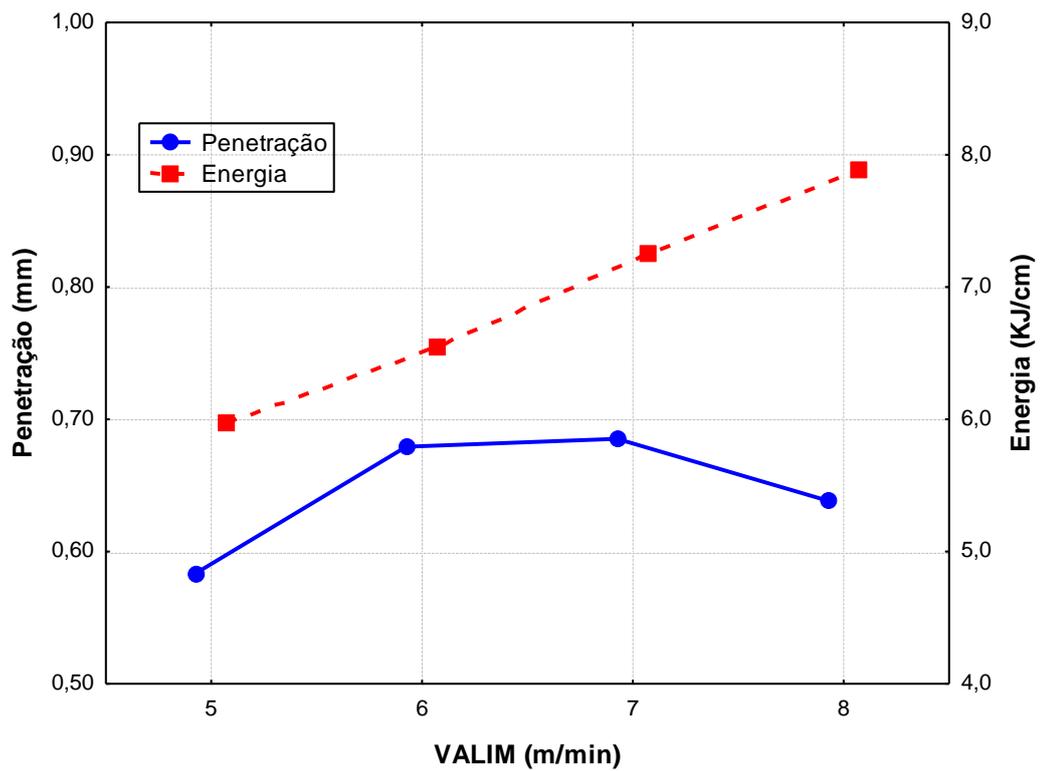


Figura 29 - Influência da Valim sobre a penetração do cordão de solda e sobre a energia corrigida.

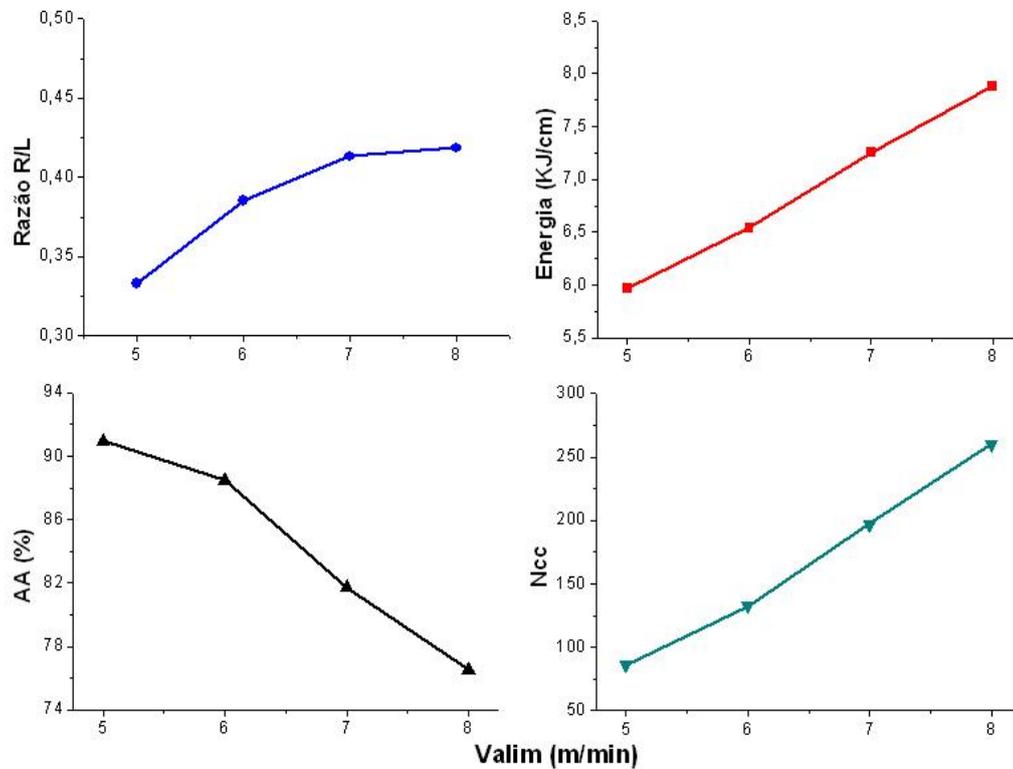


Figura 30 - Influência da Valim sobre: a razão R/L, a energia corrigida, o %AA e o Ncc.

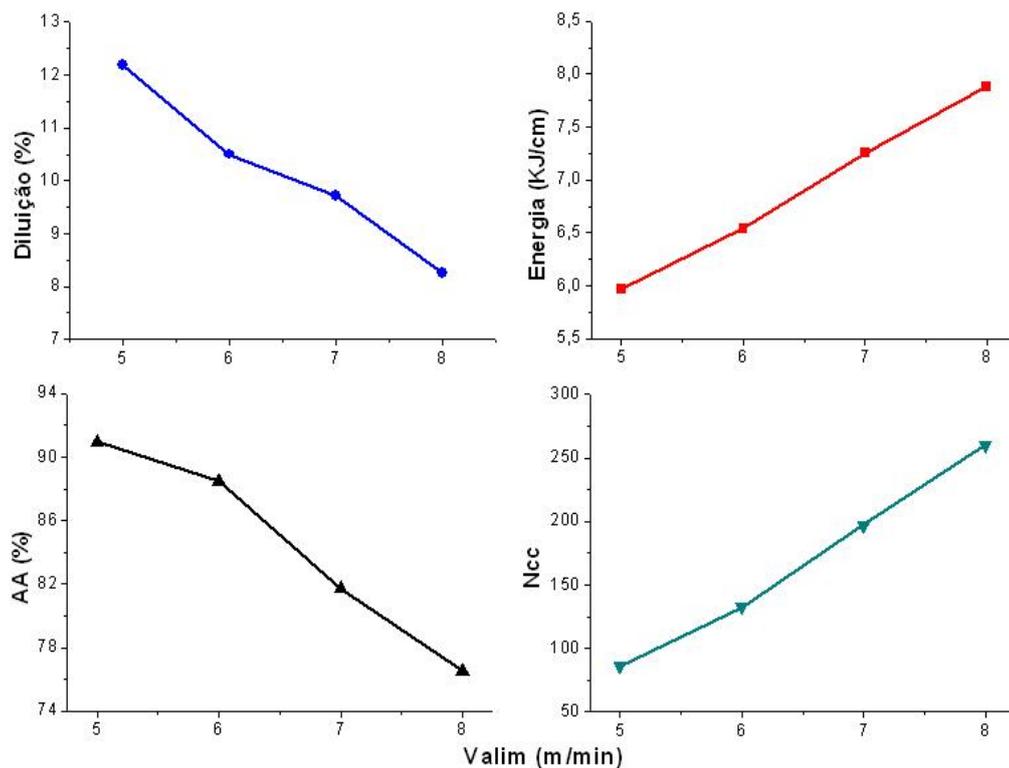


Figura 31 - Influência da Valim sobre: a diluição, a energia corrigida, o %AA e o Ncc.

Na transferência metálica por curto-circuito convencional, ou seja, a fonte de soldagem operando no modo de tensão constante, um aumento na Valim acarreta um aumento da corrente de soldagem e um aumento na taxa de deposição.

Os maiores reforços (Figura 28) e os maiores valores da razão R/L (Figura 30) obtidos com o aumento da Valim se devem a dois fatores. O primeiro fator é o aumento da taxa de deposição, o qual resulta em uma maior quantidade de material depositado por unidade de comprimento. E o segundo fator é que, mesmo com o aumento da energia por causa do aumento da corrente, a principal fonte de calor (o arco elétrico) permanece um tempo maior apagado, o que é constatado pela redução no percentual de arco aberto (%AA) e pelo aumento no número de curtos-circuitos (Ncc), o que resulta em uma poça de fusão menos aquecida e menos fluida, dificultando a molhabilidade da peça.

No caso da penetração, conforme a Figura 29, há uma tendência de aumento para as Valim de 5 a 7 m/min e, para a Valim de 8,0 m/min, há uma redução da penetração. Isso se deve ao fato de que o aumento da corrente de soldagem implica em uma maior quantidade de calor imposta a peça, mas, por outro lado, há também um aumento na quantidade de material depositado, o que, em altos valores de Valim, proporciona um elevado reforço que pode atuar como uma barreira e amortecer a força do arco sobre a poça de fusão, ocasionando uma redução na penetração (AWS, 2004; SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

A redução da diluição (Figura 31) com o aumento da Valim se deve a dois fatores já mencionados. O primeiro deles é o efeito do aumento da quantidade de material depositado que atua como uma barreira e amortece a força do arco sobre poça de fusão. Já o segundo fator refere-se ao efeito da redução do %AA e ao aumento do Ncc (maior tempo de arco apagado), ou seja, o arco permanece menos tempo transferindo calor para a peça.

5.3.3 Influência da velocidade de soldagem (Vs)

Como pode ser visto na Tabela 26, com exceção do %AA e do Ncc, a velocidade de soldagem exerceu influência significativa sobre todas as variáveis respostas analisadas, e esta influência é apresentada graficamente através das Figuras 32, 33, 34, 35 e 36 mostradas a seguir.

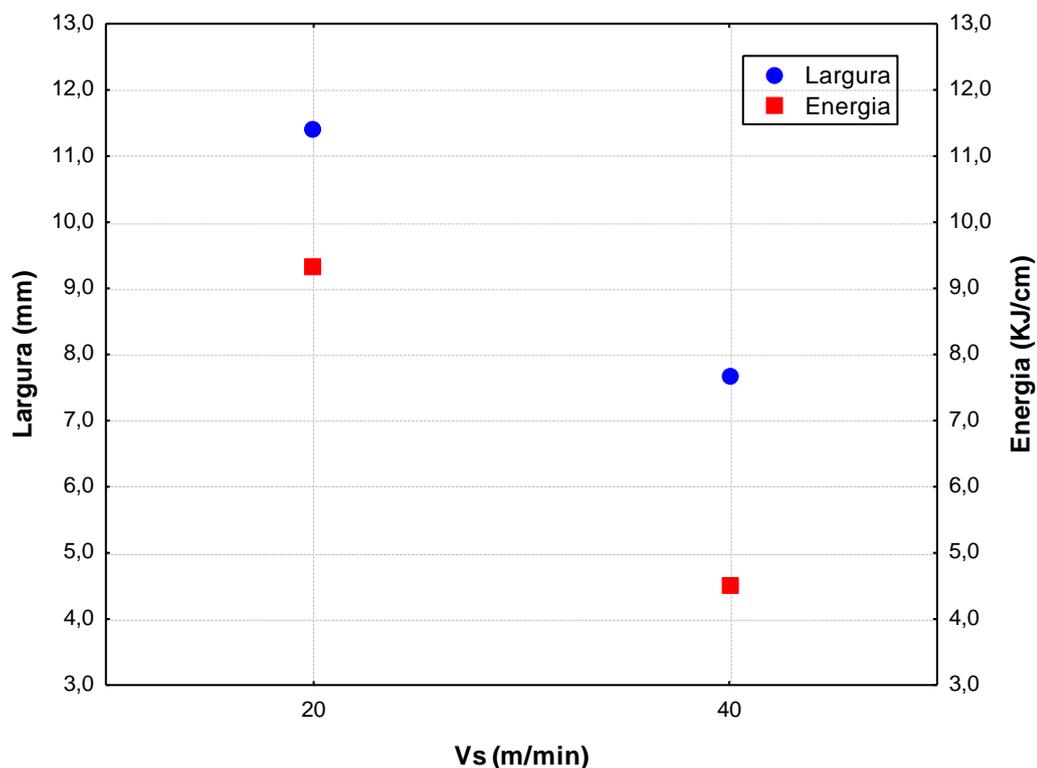


Figura 32 - Influência da Vs sobre a largura do cordão de solda e sobre a energia corrigida.

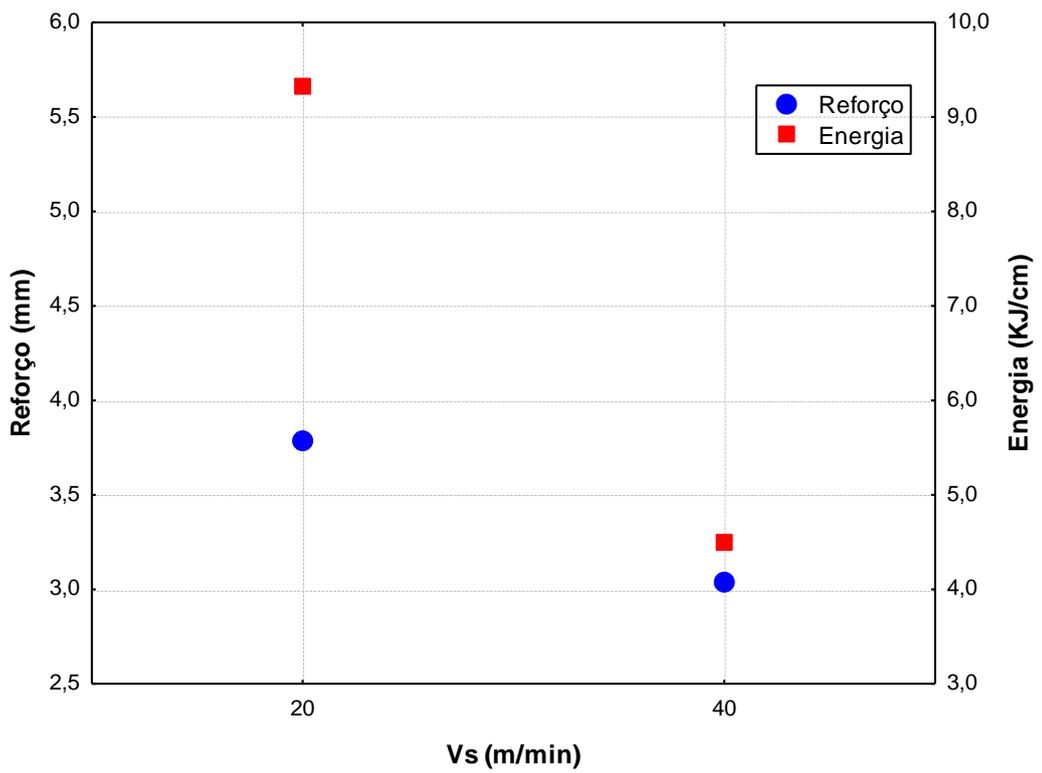


Figura 33 - Influência da Vs sobre o reforço do cordão de solda e sobre a energia corrigida.

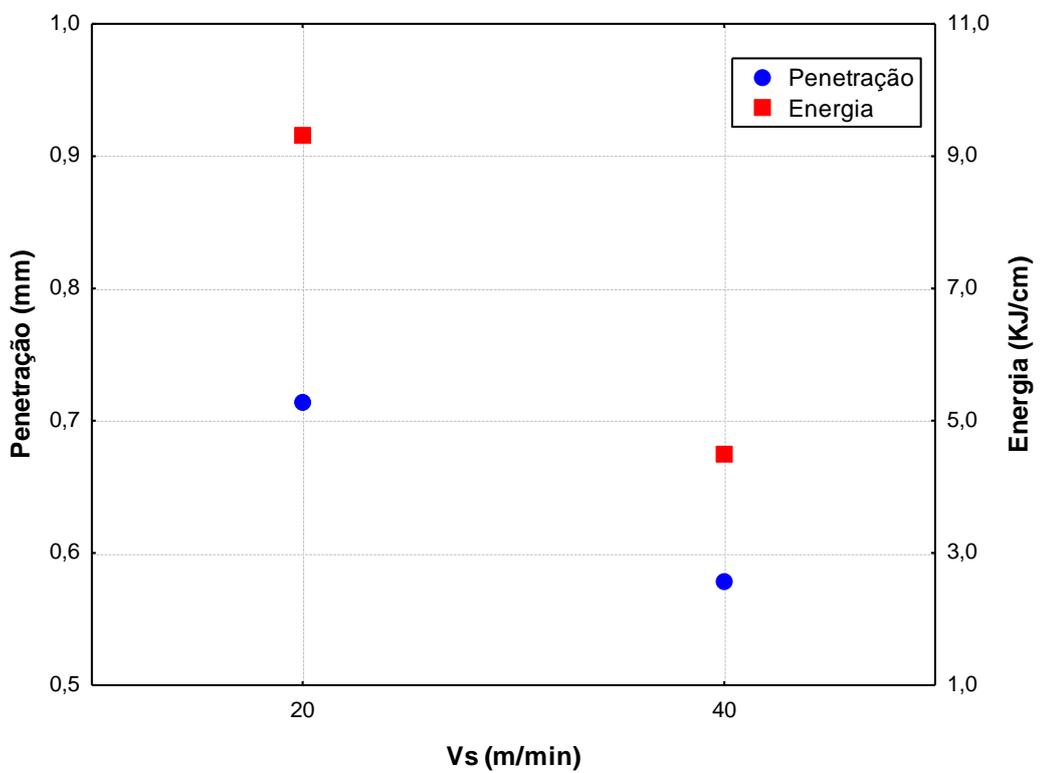


Figura 34 - Influência da Vs sobre a penetração e sobre a energia corrigida.

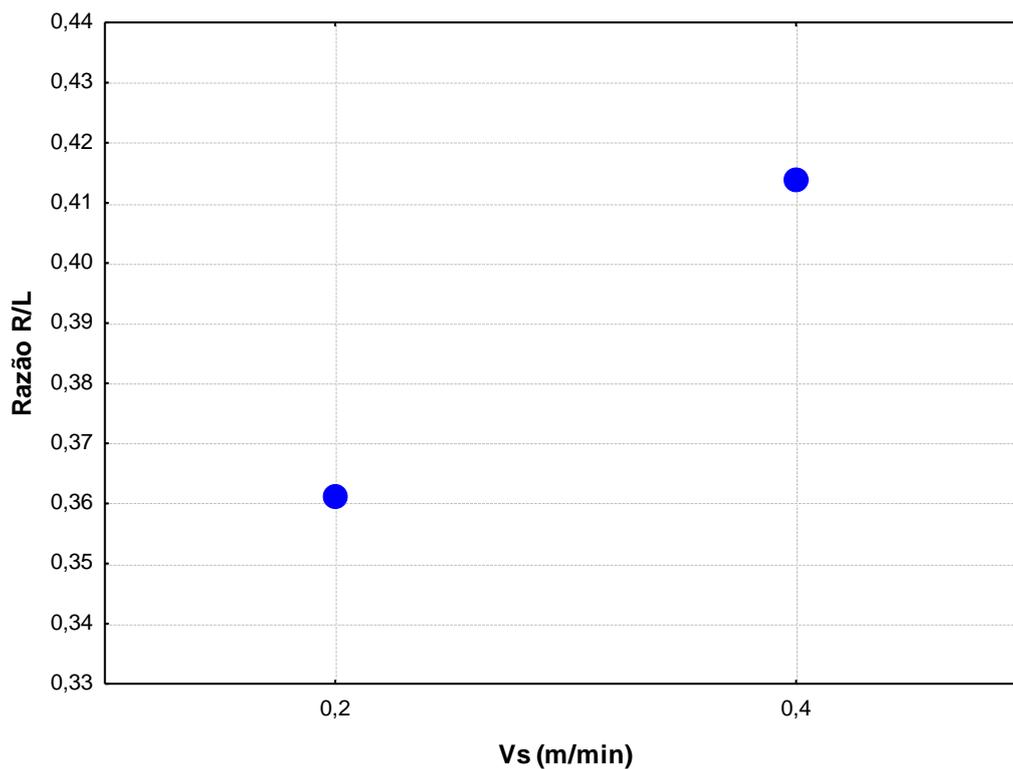


Figura 35 - Influência da Vs sobre a razão reforço/largura (R/L).

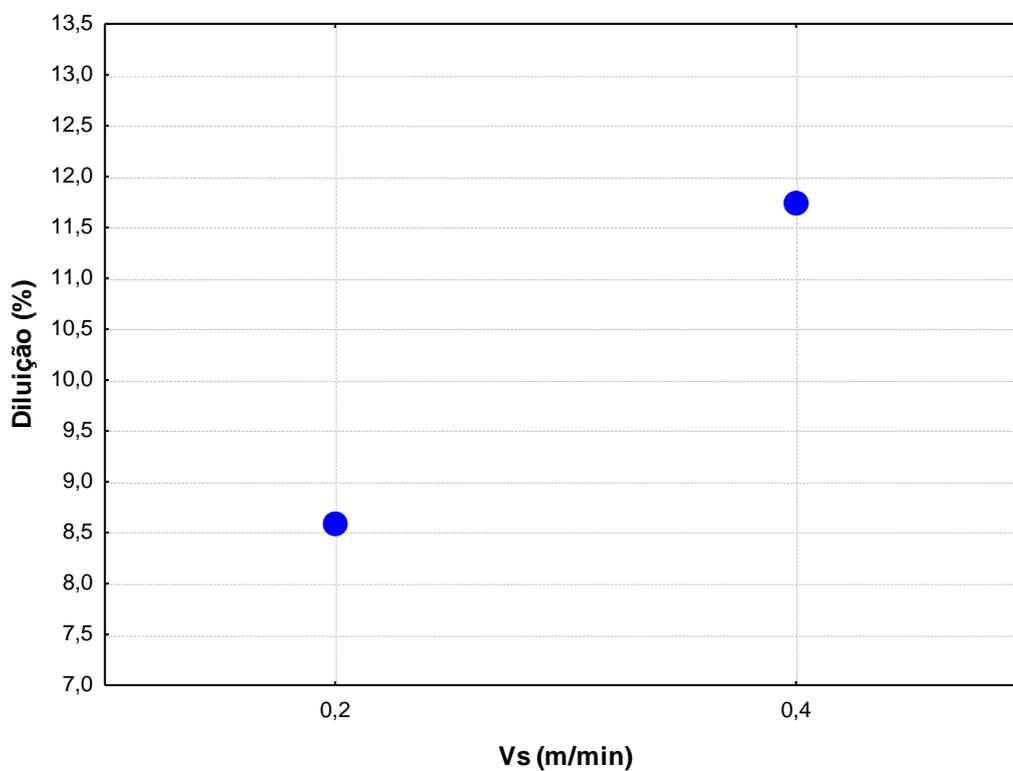


Figura 36 - Influência da Vs sobre a diluição.

De acordo com a Figura 32, a Figura 33 e a Figura 34, há uma redução nos valores de largura, reforço e penetração para maiores velocidade de soldagem. Isso se deve ao fato de

que um aumento na velocidade de soldagem promove uma redução na quantidade de material depositado por unidade de comprimento e uma redução na energia, esta última resulta em uma menor quantidade de calor imposta à peça (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

Já a razão R/L e a diluição mostradas na Figura 35 e na Figura 36 respectivamente, apresentaram aumento significativo com o aumento da velocidade de soldagem. Com relação ao fator R/L, maiores velocidades de soldagem dificultam uma melhor “molhabilidade” da peça ocasionando um reforço alto e uma largura pequena. No caso da diluição, maiores velocidades de soldagem promovem uma redução mais acentuada na área depositada ($\approx 51,6\%$) que na área fundida ($\approx 28,6\%$), como mostra a Figura 37 e a Figura 38, ocasionando assim maiores valores de diluição (KEJELIN et al., 2007; SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

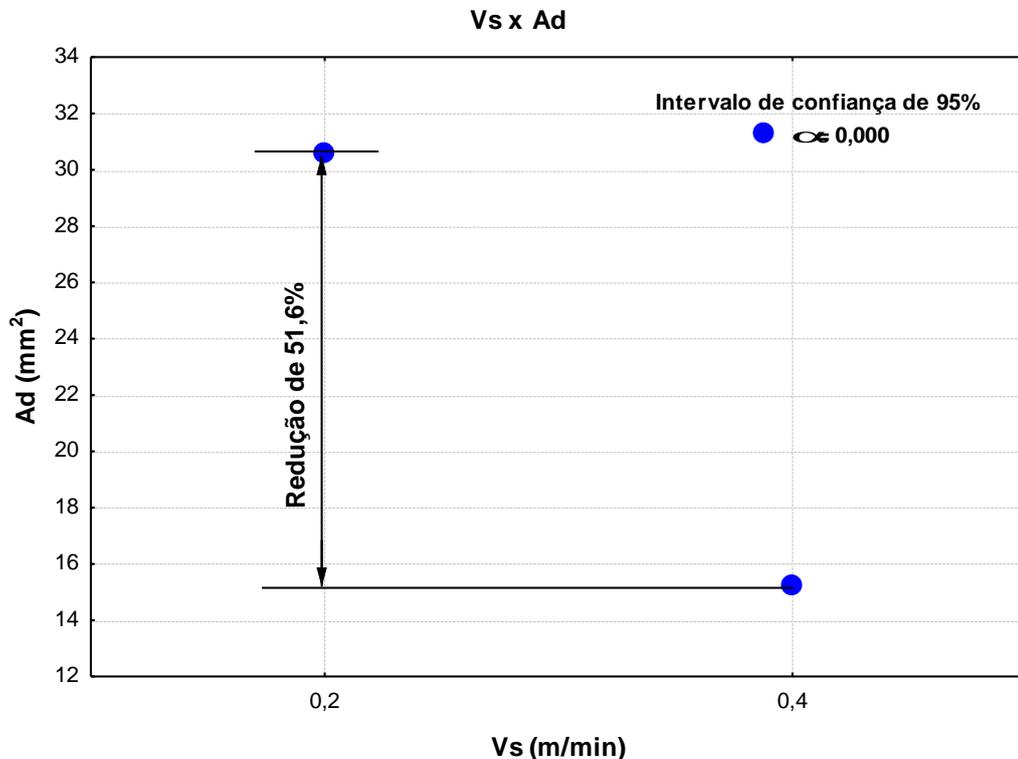


Figura 37 - Influência da Vs sobre a área depositada.

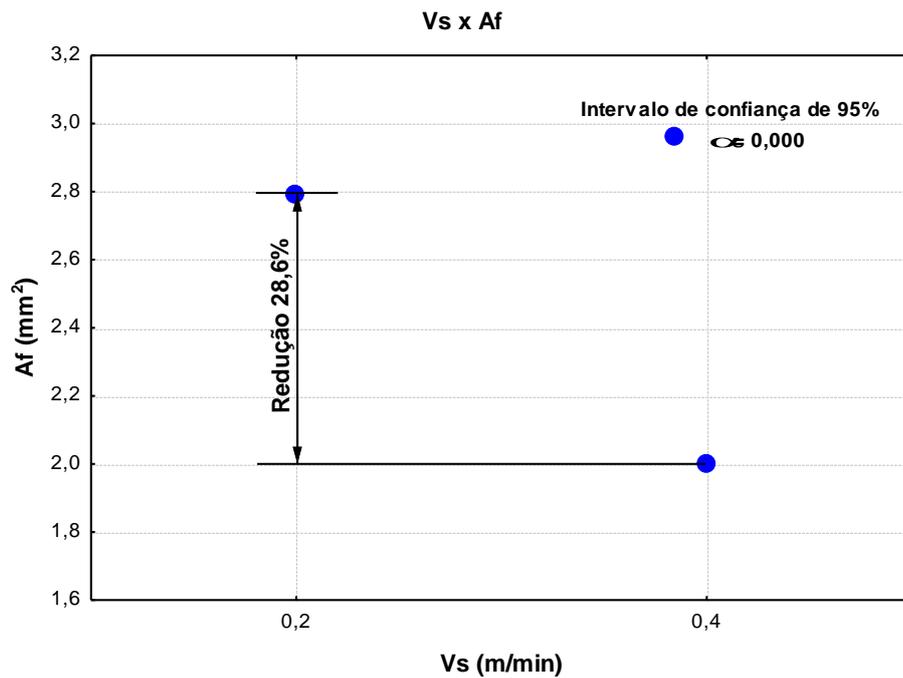


Figura 38 - Influência da Vs sobre a área fundida.

5.3.4 Influência do tecimento

Conforme a Tabela 26, o uso tecimento influenciou significativamente apenas as características geométricas dos cordões de solda (largura, reforço, penetração, razão R/L e diluição). Nas Figuras 39 a 43, são apresentados os comportamentos das variáveis respostas afetadas nas condições sem tecimento (ST) e com o uso do tecimento triangular (TT).

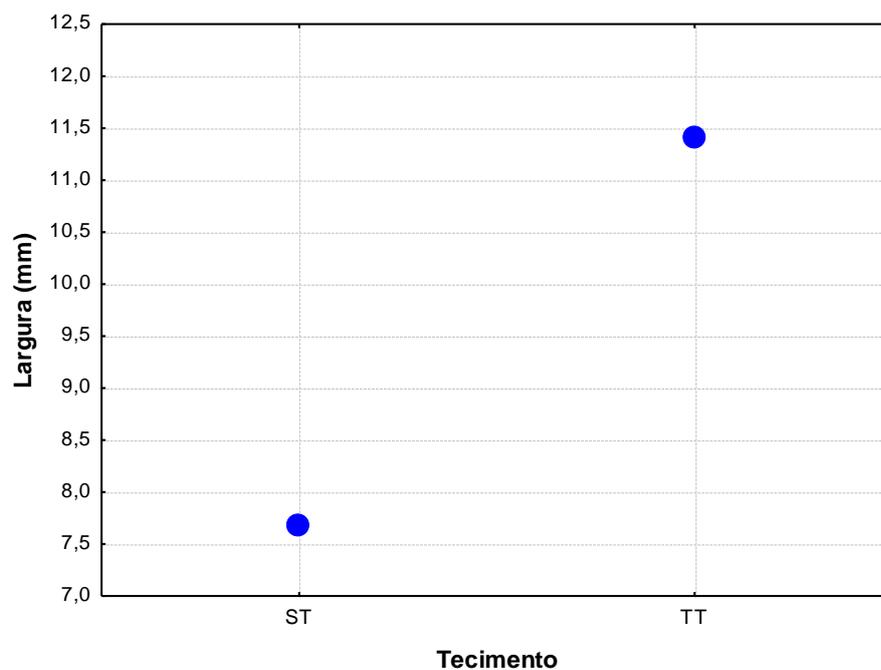


Figura 39 - Influência do tecimento sobre a largura do cordão de solda.

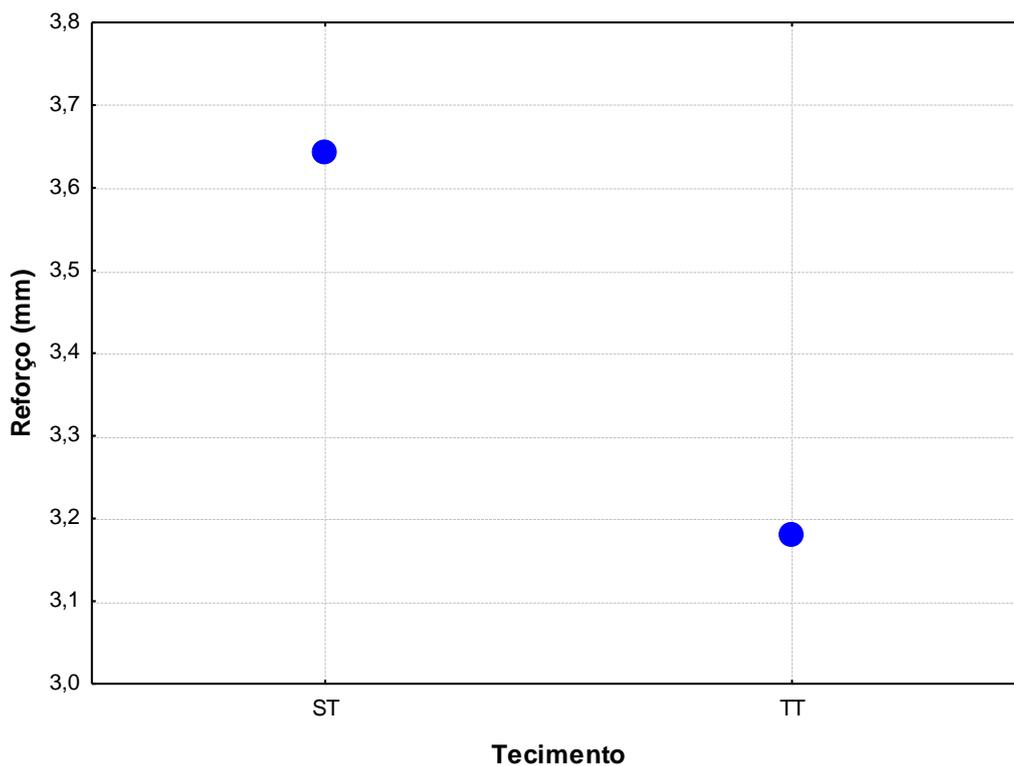


Figura 40 - Influência do tecimento sobre o reforço do cordão de solda.

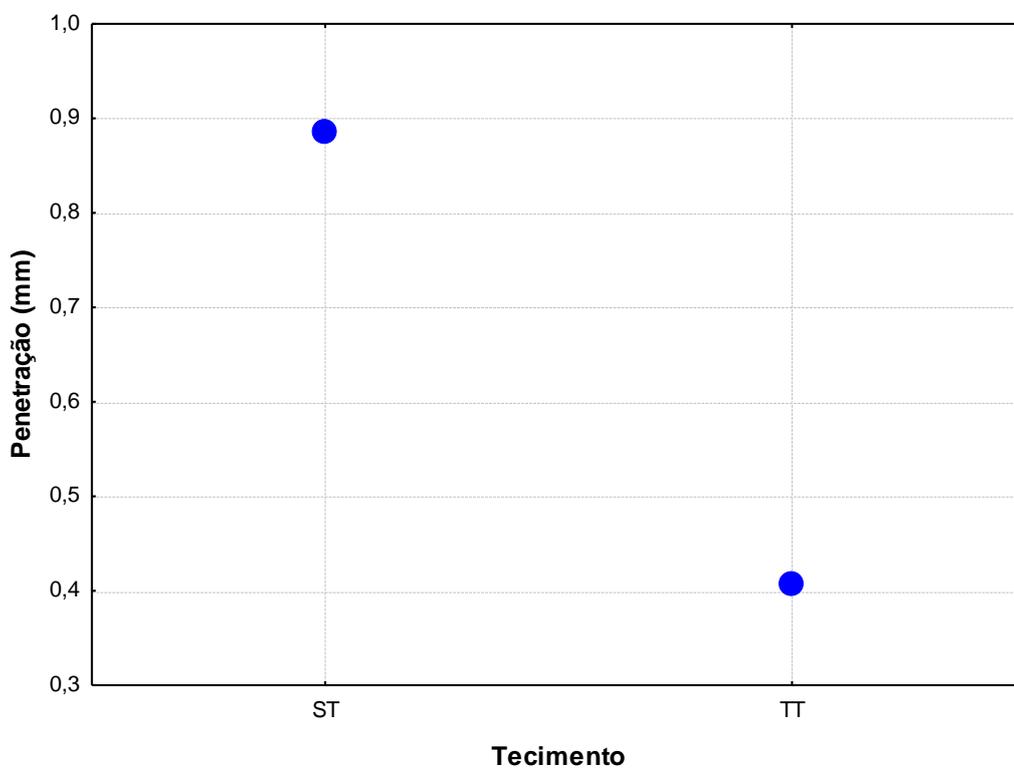


Figura 41 - Influência do tecimento sobre a penetração do cordão de solda.

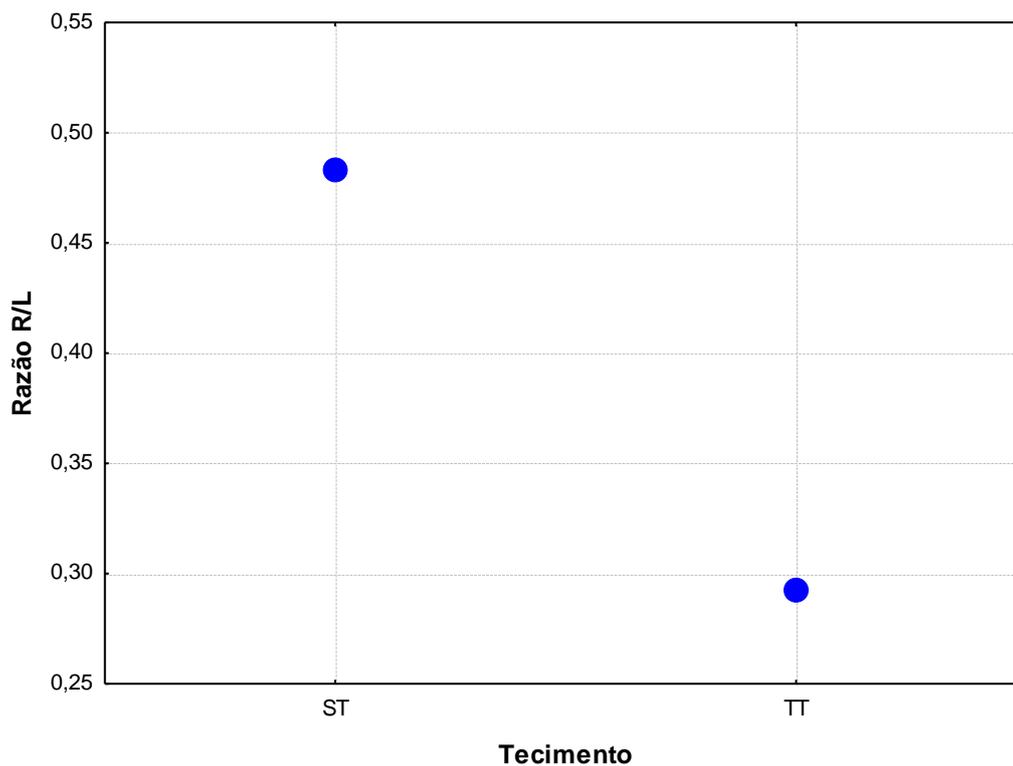


Figura 42 - Influência do tecido sobre a razão reforço/largura (R/L).

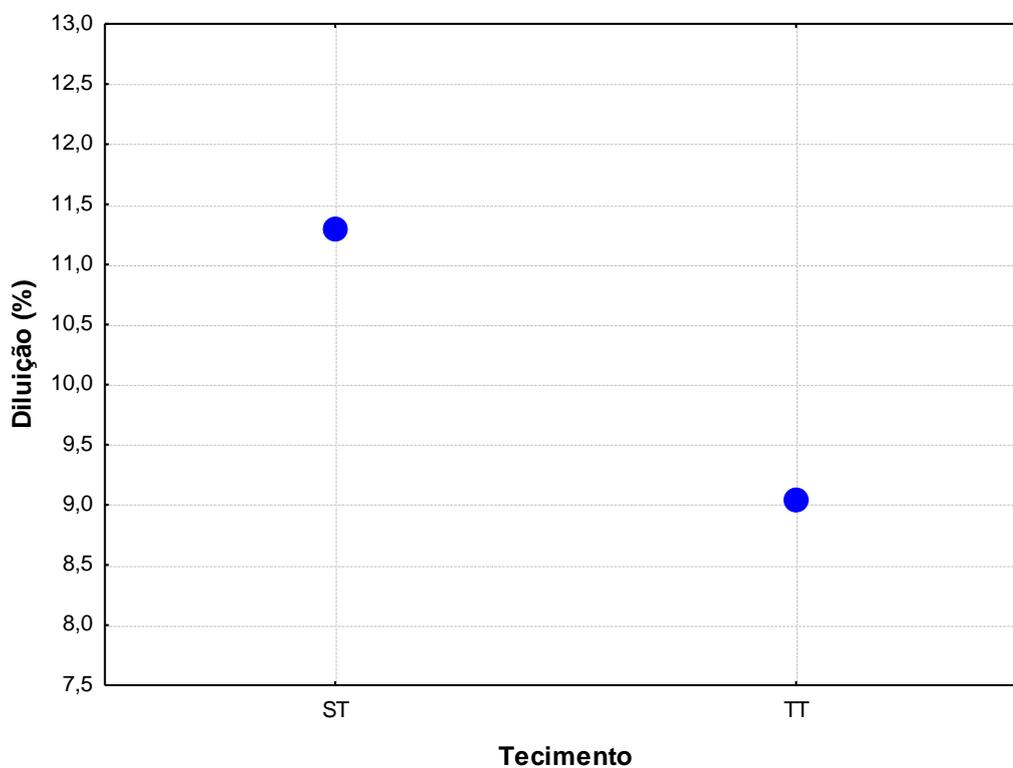


Figura 43 - Influência do tecido sobre a diluição.

Com o uso do tecido é possível aquecer mais nas laterais da poça de fusão aumentando sua capacidade de molhamento e proporcionando uma melhor distribuição da

quantidade de material depositado sobre o material de base, o que resulta numa maior largura e num menor reforço para os cordões de solda, reduzindo assim também os valores da razão R/L, como se observa nas Figuras 39, 40 e 42 (MAGALHÃES, 2008; SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

Com relação à penetração e à diluição, apresentadas nas Figuras 41 e 43, há uma redução nos seus valores na condição em que se efetuou o uso do tecimento, devido ao arco ser jogado mais nas laterais da poça, evitando que a força do arco atue sobre o centro a poça de fusão, região onde o material depositado ainda é somente líquido (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

As melhorias significativas em todas as variáveis respostas obtidas pelo uso do tecimento mostradas através dos gráficos das Figuras 39 a 43 também podem ser comprovadas através da comparação entre a Figura 44 e a Figura 45.

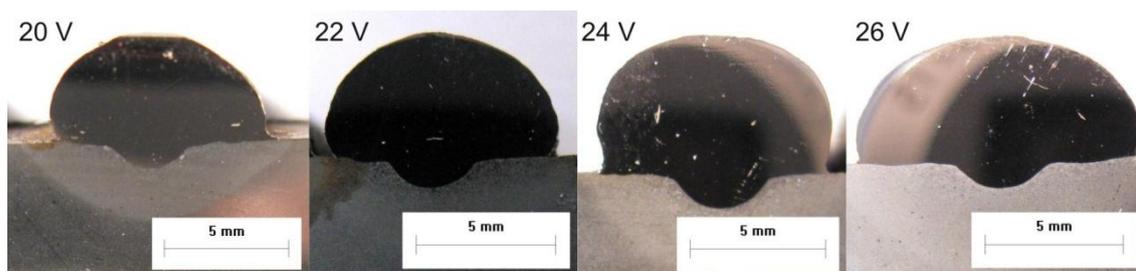


Figura 44 – Geometria dos cordões de solda sem tecimento

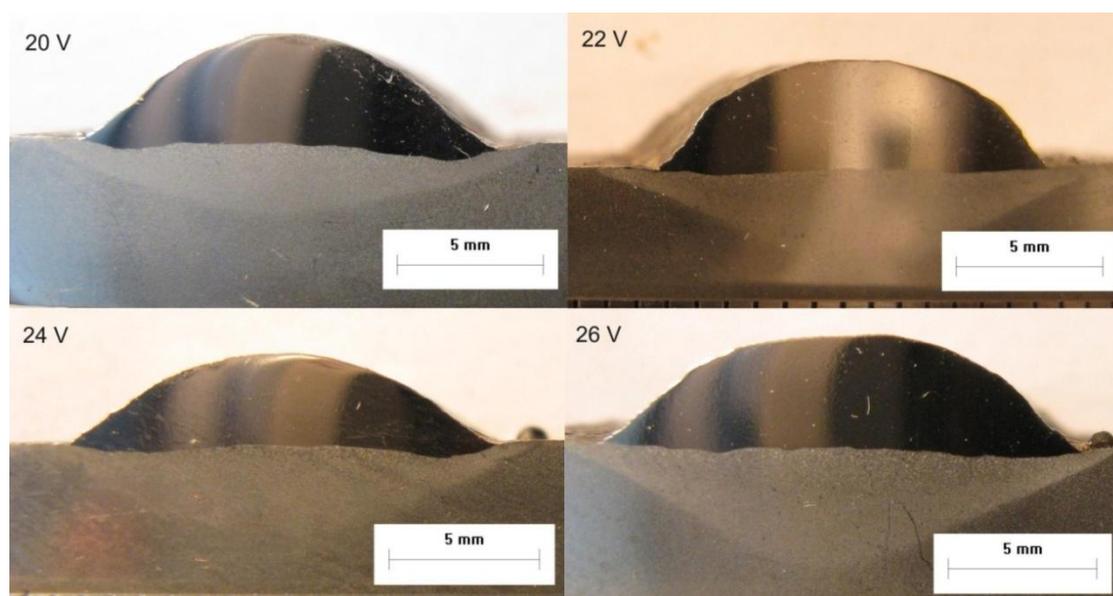


Figura 45 - Geometria dos cordões de solda com tecimento triangular.

5.4 Considerações finais

- Foi possível obter a transferência metálica por curto-circuito para tensões de referência (U_r) da ordem de 20 a 24 V e para velocidades de alimentação (V_{alim}) na faixa de 5,0 a 8,0 m/min.
- As soldagens em que se utilizou uma tensão de referência de 26 V e velocidades de alimentação do arame inferiores a 8,0 m/min apresentaram transferências metálicas mistas do tipo globular/curto-circuito, gerando instabilidade e fugindo assim do escopo do trabalho. Por isso, este nível de tensão de referência não será utilizado para realização de ensaios na próxima etapa.
- O Ensaio 4 ($U_r=20$ V, $V_{alim}=8,0$ m/min, $V_s=0,2$ m/min e sem tecimento) teve sua soldagem inviabilizada devido a problemas de extinção do arco elétrico, pois a taxa de fusão foi insuficiente para manter um comprimento mínimo de arco.
- As soldagens sem o uso do tecimento apresentaram geometrias do tipo taça, comuns nas soldagens utilizando argônio, como gás de proteção. Observa-se ainda, nas soldagens sem o uso de tecimento, que os cordões de solda apresentaram um alto valor de reforço, com valores de largura e penetração baixos o que gera uma convexidade excessiva (valores altos da razão R/L) destes cordões. Já nas soldagens com o uso do tecimento, os cordões apresentaram valores baixos da razão R/L, sendo estes cordões mais indicados para soldagens de revestimento, pois minimizam a possibilidade da ocorrência de vazios ao se efetuar a sobreposição dos cordões de solda em uma operação de revestimento.
- Os resultados apresentados na Tabela 24 e na Tabela 25 mostram que, com a transferência por curto-circuito, é possível obter-se diluições do cordão de solda com valores máximos de 18,58% (Ensaio 37) e valores mínimos de 2,13% (Ensaio 19), ou seja, a transferência por curto-circuito é capaz de obter baixos valores de diluição chegando à ordem de 2% quando se efetua o tecimento.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas Etapas 2 e 3. As informações obtidas serão abordadas de acordo com os critérios estabelecidos na metodologia descrita no Capítulo 4.

Primeiramente, serão apresentados e discutidos os resultados referentes às duas matrizes L9 definidas na metodologia. Posteriormente, serão feitas a análise e a discussão dos resultados das características econômicas apresentadas por estas duas matrizes L9. E, por fim, serão abordados os resultados referentes à soldagem dos revestimentos.

6. Etapa 2 – Ensaios definitivos

6.1 Aplicação do método Taguchi

O método Taguchi foi utilizado nesta etapa do trabalho de forma a cumprir, com um reduzido número de ensaios, dois objetivos: o primeiro foi obter a influência dos fatores de controle sobre as variáveis respostas, e o segundo foi determinar as condições ideais para aplicação das ligas de níquel nas soldagens de revestimentos. De acordo com o método Taguchi e com base nos fatores de controle escolhidos, os ensaios realizados foram divididos em duas matrizes L9, resultando num total de 18 ensaios (excluindo os testes de confirmação), cerca de 1/9 dos ensaios necessários em um fatorial completo (162 ensaios). Os valores das variáveis respostas obtidos nestes ensaios serão apresentados nos tópicos a seguir.

6.2 Matriz ortogonal L9-1

Esta matriz L9 foi montada com base nas informações retiradas dos ensaios preliminares, em que a tensão de referência (U_r), o tecimento e a velocidade de soldagem (V_s) foram mantidos como fatores de controle. Mas foram realizadas algumas modificações com relação aos ensaios preliminares. A velocidade de alimentação (V_{alim}) foi substituída pela técnica da tocha (T.T) como fator de controle, o quarto nível ($U_r = 26$ V) da tensão de referencia foi extinto, devido a problemas de transferência metálica deste nível já mencionados nos ensaios preliminares. E, por fim, foi acrescentado mais um nível (Duplo oito) ao fator de controle tecimento, tanto para manter a ortogonalidade da matriz L9 quanto para se fazer um estudo mais detalhado sobre o efeito deste fator de controle nas variáveis respostas.

A sequência de execução das soldagens e os parâmetros utilizados nos ensaios desta matriz encontram-se descritos na metodologia. Todos os resultados e análises realizadas com base nestes ensaios serão apresentados com mais detalhes a seguir.

6.2.1 Características geométricas dos cordões

A Tabela 27 apresenta os valores das características geométricas: largura (L), reforço (R), penetração (P), diluição (D), razão reforço/largura (R/L) e produto D \times R/L (D \times R/L) para os cordões de solda obtidos nos ensaios da matriz L9-1, cujos fatores de controle estão listados na Tabela 22 (página 61). A partir destes dados, pôde-se fazer uma análise usando o projeto robusto de experimentos (método Taguchi) para encontrar os melhores parâmetros de soldagem para a aplicação em revestimentos, tendo como critérios de qualidade as seguintes variáveis respostas: diluição, razão R/L e o produto D \times R/L.

Tabela 27 - Valores das características geométricas para a primeira L9.

Amostra	Posição*	L (mm)	R (mm)	P (mm)	R/L	D (%)	D x R/L
R01	Início	9,27	3,49	0,71	0,38	5,98	2,25
R01	Final	8,89	3,53	0,54	0,40	6,14	2,44
R02	Início	10,83	2,86	0,31	0,26	6,28	1,66
R02	Final	11,07	2,70	0,35	0,24	5,78	1,41
R03	Início	6,94	3,99	0,39	0,57	7,56	4,35
R03	Final	6,40	4,09	0,39	0,64	5,24	3,35
R04	Início	8,54	2,92	0,26	0,34	8,75	2,99
R04	Final	7,84	2,67	0,21	0,34	6,38	2,17
R05	Início	15,13	3,12	0,34	0,21	6,22	1,28
R05	Final	14,19	3,28	0,39	0,23	6,08	1,41
R06	Início	6,30	3,51	0,89	0,56	12,20	6,79
R06	Final	7,31	3,48	0,79	0,48	8,53	4,06
R07	Início	11,53	2,70	0,39	0,23	10,68	2,50
R07	Final	11,58	2,26	0,43	0,20	14,28	2,79
R08	Início	6,83	2,81	0,47	0,41	6,75	2,78
R08	Final	6,48	2,88	0,50	0,44	7,14	3,17
R09	Início	14,65	3,21	0,48	0,22	8,47	1,85
R09	Final	14,31	3,26	0,30	0,23	5,53	1,26

*Indica a posição de onde foram retiradas as amostras (Figura 16).

6.2.2 Aspecto superficial

De uma forma geral, os ensaios para esta matriz apresentaram cordões de solda com bons aspectos superficiais, com a presença de poucos respingos, e não foram detectados outros defeitos, como mordeduras, trincas, falta de fusão dentre outros. Mas, nas condições em que foram empregadas velocidades de soldagem acima de 0,2 m/min e nas condições sem uso de tecimento, foram obtidos cordões com um perfil do tipo taça, muito estreitos e com valores da razão R/L elevados. A Figura 46 e a Figura 47 mostram o aspecto superficial e a seção transversal respectivamente para o corpo de prova do ensaio R8, que exemplifica bem o fato relatado anteriormente. Vale ressaltar, que com $V_s = 0,2$ m/min e uso de tecimento, foi possível obter cordões com uma largura e convexidade (razão R/L) mais adequados a aplicações de revestimentos como mostra a Figura 48 e a Figura 49.



Figura 46 - Aspecto superficial do cordão de solda com $U_r=24$ V, T.T=Empurrando, Tecimento=ST e $V_s=0,4$ m/min (Ensaio R8).

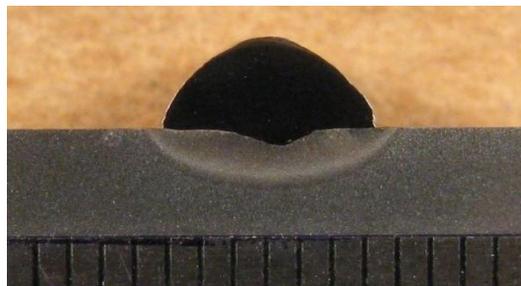


Figura 47 - Seção transversal do cordão de solda com $U_r=24$ V, T.T=Empurrando, Tecimento=ST e $V_s=0,4$ m/min (Ensaio R8).



Figura 48 - Aspecto superficial do cordão de solda com $U_r=24$ V, T.T=Puxando, Tecimento=TT e $V_s=0,2$ m/min (Ensaio R9).



Figura 49 - Seção transversal do cordão de solda com $U_r=24$ V, T.T=Puxando, Tecimento=TT e $V_s=0,2$ m/min (Ensaio R9).

6.2.3 Análise de variância no método Taguchi

Com os resultados obtidos referentes às soldagens da matriz L9-1 (Tabela 27), foi realizada uma análise estatística de variância no método de Taguchi, e com isso foi calculado o nível de significância " α " dos fatores de controle sobre a diluição, a razão R/L e o produto DxR/L . Níveis de significância menores que 0,05 (valores sublinhados e em negrito na Tabela 28) indicam efeitos estatisticamente significativos, ou seja, há uma probabilidade de acerto de 95% em se admitir que este fator de controle esteja influenciando nas variáveis de resposta analisadas.

Tabela 28 - Nível de significância dos fatores de controle sobre as variáveis respostas.

Fator de Controle	Nível de α		
	Diluição	R/L	DxR/L
Ur (V)	<u>0,044</u>	<u>0,000</u>	0,484
T.T	0,103	<u>0,000</u>	<u>0,003</u>
Tecimento	0,411	<u>0,000</u>	<u>0,001</u>
Vs (m/min)	<u>0,021</u>	<u>0,000</u>	<u>0,001</u>

Como pode ser visto na Tabela 28, a diluição sofreu influência significativa apenas de dois fatores de controle, a tensão de referência (U_r) e a velocidade de soldagem (V_s), o que demonstra uma concordância com a análise de variância feita para o fatorial completo nos ensaios preliminares, divergindo apenas com relação ao tecimento que afetou a diluição no fatorial completo e não afetou no método Taguchi. Já a razão R/L foi influenciada significativamente por todos os fatores de controle. E, por fim, o produto DxR/L só não foi afetado significativamente pela tensão de referência.

6.2.4 Previsão da combinação ótima

Uma das grandes vantagens da condução de experimentos usando o método Taguchi é a previsão da combinação que fornece uma resposta ótima de cada fator de controle. Então de

posse dos resultados obtidos na Tabela 27, foram avaliadas as variáveis respostas diluição, razão R/L e DxR/L através de um tratamento estatístico do método Taguchi, onde essas variáveis são um problema de solução do tipo “quanto menor melhor”(Equação 11). Assim as condições necessárias para obter os valores mínimos das variáveis respostas são representadas pelo maior valor de η (eta) mostrado na Figura 50, na Figura 51 e na Figura 52.

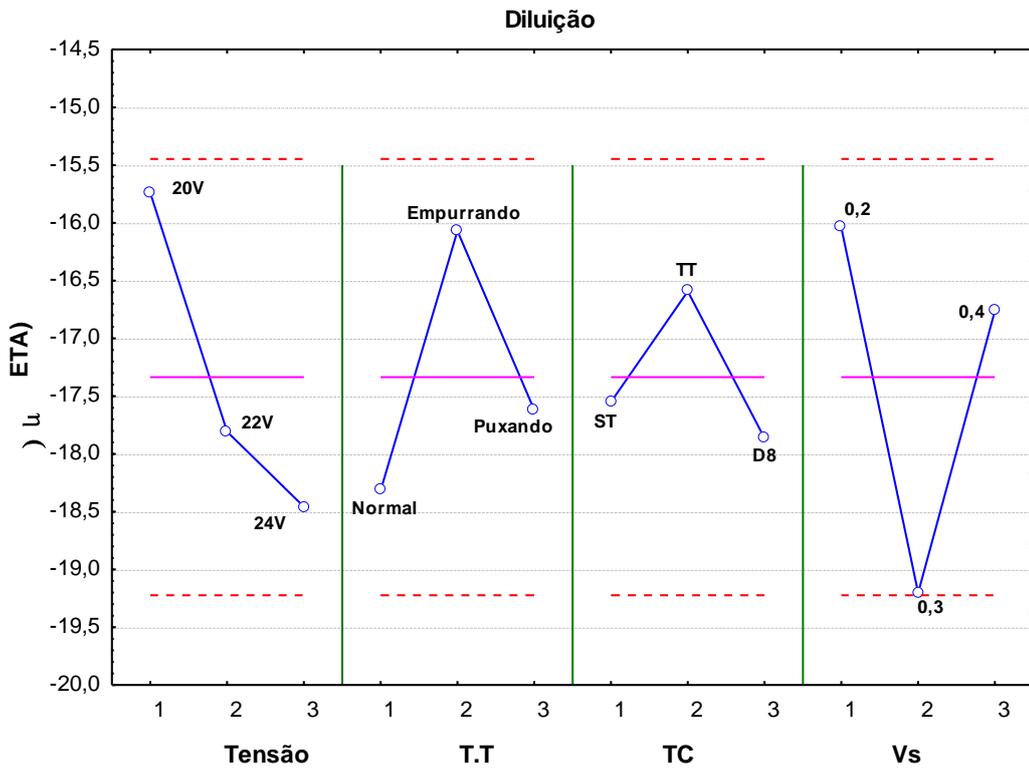


Figura 50 - Influência dos fatores de controle sobre a diluição.

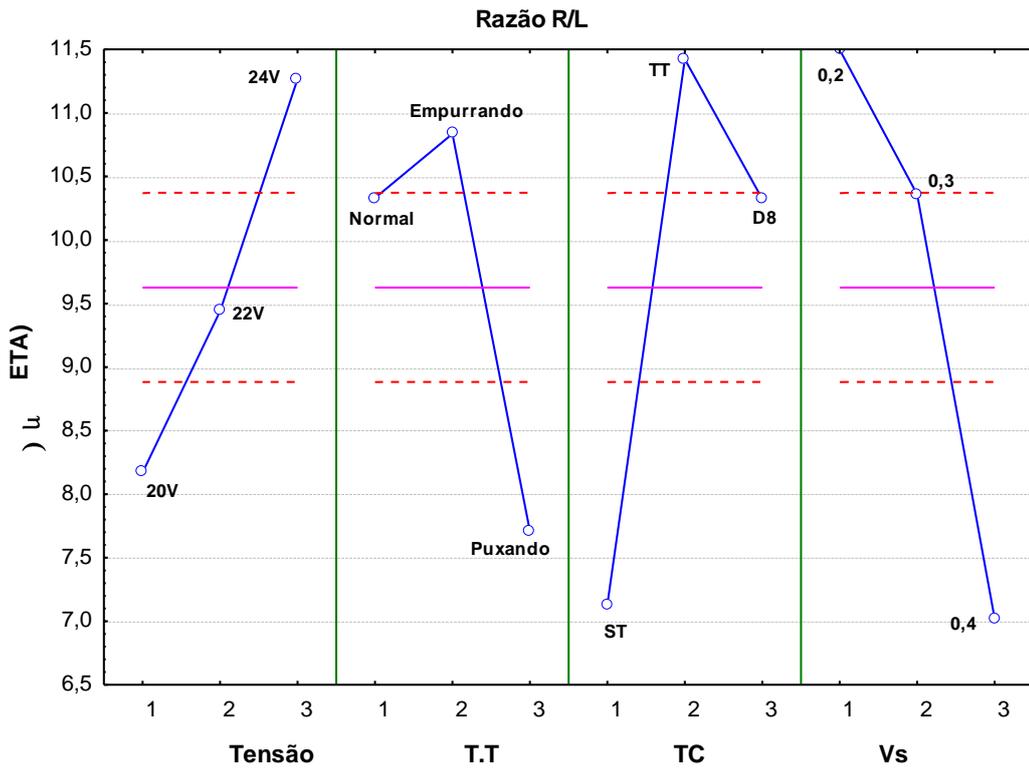


Figura 51 - Influência dos fatores de controle sobre a razão R/L.

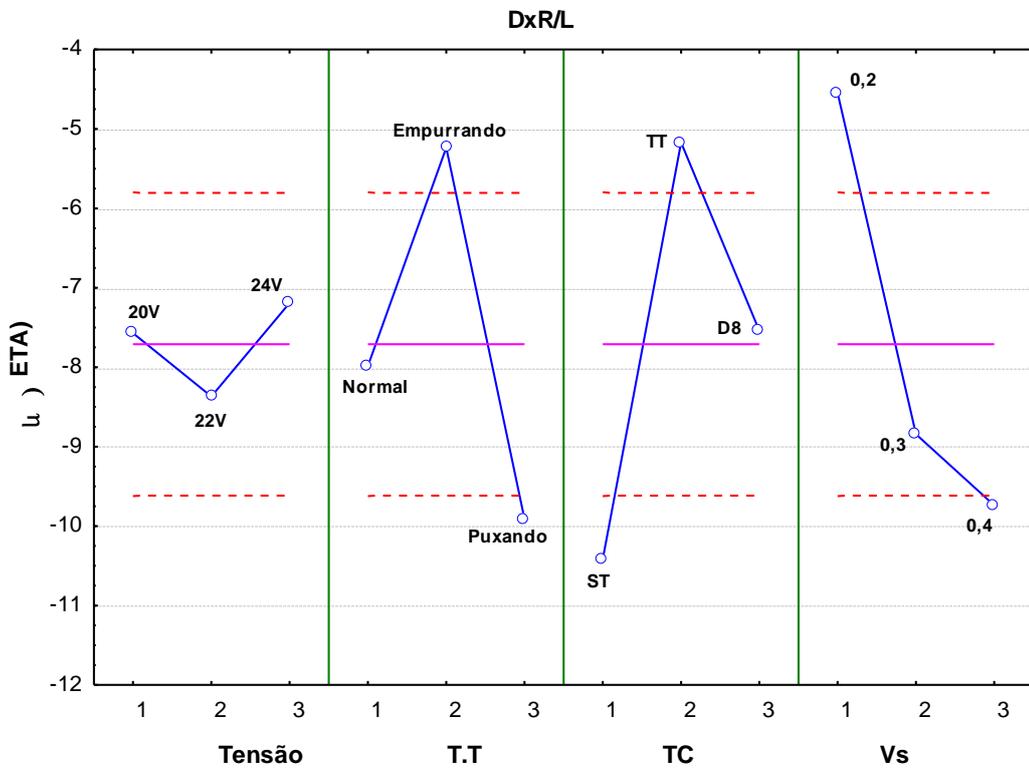


Figura 52 - Influência dos fatores de controle sobre DxR/L.

- Conforme a Figura 50, a diluição é minimizada para a combinação de fatores de controle nos níveis “1 2 2 1”, ou seja, tensão de referência de 20 V, técnica da tocha empurrando, tecimento triangular e velocidade de soldagem de 0,2 m/min.
- Já a razão R/L (Figura 51) e o produto DxR/L (Figura 52) apresentam valores mínimos para a combinação de fatores de controle nos níveis “3 2 2 1”, ou seja, tensão de referência de 24 V, técnica da tocha empurrando, tecimento triangular e velocidade de soldagem de 0,2 m/min.

Estes ensaios não estão contemplados na Tabela 22 (Capítulo 4) sendo necessária a realização de ensaios de confirmação para verificar a veracidade de que essas combinações minimizam as variáveis respostas.

6.2.5 Testes de confirmação

A Tabela 29 mostra os valores das características geométricas das variáveis respostas obtidos nas soldagens realizadas com os níveis dos fatores de controle indicados pelos ensaios de confirmação, enquanto a Tabela 30 mostra os valores previstos pelo tratamento estatístico do método Taguchi e os valores reais obtidos nas soldagens denominados nesta tabela de valores medidos.

Tabela 29 - Valores das características geométricas das variáveis respostas para os ensaios de confirmação.

Ensaio	Combinação de fatores	L (mm)	R (mm)	P (mm)	R/L	D (%)	DxR/L
RC01-Início	1 2 2 1	14,9	3,0	0,5	0,20	6,2	1,3
RC01-Final		15,3	3,2	0,4	0,21	5,2	1,1
RC02-Início	3 2 2 1	16,0	2,9	0,4	0,18	8,0	1,4
RC02-Final		16,3	2,9	0,4	0,18	6,0	1,1

Tabela 30 - Valores previstos e medidos das variáveis respostas para os ensaios de confirmação.

Ensaio	Critério	η (eta)	Valor previsto	Valor medido
RC01	D (%)	-12,44	4,2	5,7
RC02	R/L	16,14	0,16	0,18
RC02	Dx(R/L)	0,99	0,9	1,2

6.2.6 Análise do critério de qualidade diluição (D)

Conforme pode ser observado pela coluna “Variação Causada” da Tabela 31, os fatores que mais afetaram o valor da diluição foram Ur, Vs e técnica da tocha (T.T). O teste de confirmação apresentou uma diluição de 5,7 % (ensaio RC01 na Tabela 30). O intervalo admissível calculado, conforme mostrado no apêndice I foi de 2,9 a 6,0%. Como o valor da diluição obtida pelo ensaio de confirmação está dentro do intervalo de confiança, conclui-se que este critério de qualidade pode ser avaliado com segurança pelo método Taguchi. Vale ressaltar que o valor de diluição obtido por este ensaio é adequado para as soldagens de revestimento, pois proporcionará baixo teor de ferro, o qual é exigido pela norma ISO 10423 (ISO 10423, 2003) adotada pela Petrobras para as soldagens de revestimento em equipamentos com revestimentos metálicos.

Tabela 31 - Resumo dos parâmetros importantes no método Taguchi para a diluição.

Previsão de η dentro das melhores condições			
Fator de Controle	Nível do Fator	Variação Causada	Erro Padrão
Ur (V)	20	1,59	0,94
T.T	Empurrando	1,26	0,94
Tecimento	Triangular	0,74	0,94
Vs (m/min)	0,2	1,29	0,94
η previsto		-12,44	

Analisando conjuntamente a Tabela 28, a Tabela 31 e a Figura 50, é possível extrair as seguintes informações do uso do método Taguchi com relação à influência dos fatores de controle sobre a diluição:

- A Ur, além de influenciar significativamente, foi também o fator de controle que mais afetou a diluição. O Nível 1 (20 V) deste fator é apontado como Nível que apresenta menor diluição, seguido do Nível 2 (22 V) e, por fim, do Nível 3 (24 V). Resultado coerente com o já apresentado nos ensaios preliminares, onde para maiores valores de Ur, tem-se um aumento da largura do cordão de solda e redução no reforço, havendo assim um aumento significativo da área fundida do metal de base enquanto a área depositada do cordão de solda não foi afetada significativamente resultando em maiores valores de diluições.
- A técnica da tocha, apesar de não influenciar significativamente, pode ser relevante para obtenção de menores diluições. Assim o método Taguchi aponta que, para este fator de controle, o Nível 2 (empurrando) seria o ideal sucedido pelo Nível 1 (normal) e, por último,

pelo Nível 3 (puxando). Isso se deve ao fato de que a posição empurrando o arco provoca um pré-aquecimento à frente da poça que está se formando, aumentando a molhabilidade e proporcionando de forma geral cordões de solda mais largos e com menores penetrações resultando em menores valores de diluição conforme citado na literatura (AWS, 2004; SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

- A V_s assim como a U_r afetou significativamente a diluição. O menor valor de diluição é obtido para o Nível 1 (0,2 m/min) deste fator, o Nível 3 (0,4 m/min) apresentará um valor intermediário e o Nível 2 (0,3 m/min) apresentará a maior diluição. Este fato se deve à relação entre a velocidade de soldagem e a penetração que resulta na área fundida (utilizada no cálculo da diluição) ser influenciada por dois efeitos a serem considerados: o efeito da energia imposta e o efeito da sobreposição de poças. Assim para a V_s de 0,2 m/min, o efeito da sobreposição da poça prevalece, ou seja, há uma maior quantidade de material interposto entre o arco e o metal de base tornando mais difícil a transferência de calor para o metal de base e, com isso, temos uma menor penetração que resulta numa menor diluição. Já, com relação à V_s de 0,4 m/min, o efeito que prevalece é o da energia imposta, ou seja, esta velocidade de soldagem encontra-se numa faixa que uma maior velocidade implica em um menor aporte térmico por unidade de comprimento imposto à peça o que resulta em uma menor penetração e, conseqüentemente, uma menor diluição. E, por fim, a V_s de 0,3 m/min encontra-se numa faixa de velocidade de soldagem que há uma interação entre os dois efeitos, ou seja, a velocidade não é baixa o suficiente para produzir uma poça capaz de evitar a ação direta da força do arco sobre o metal de base e velocidade também não é alta o suficiente para reduzir consideravelmente o aporte térmico imposto ao metal de base, resultando assim na máxima penetração alcançada e por consequência na maior diluição obtida (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

6.2.7 Análise do critério de qualidade R/L

Conforme pode ser observado pela coluna “Variação Causada” da Tabela 32, praticamente todos os fatores afetaram de forma igual a razão R/L com maior destaque para V_s e Tecimento. O teste de confirmação apresentou uma razão R/L de 0,18 (Ensaio RC02 na Tabela 30). O intervalo admissível calculado segundo as equações mostradas no apêndice I foi de 0,13 a 0,18. Como o valor obtido pelo ensaio de confirmação está dentro do intervalo de confiança, conclui-se que o método Taguchi consegue avaliar a razão R/L com segurança. Vale ressaltar que o valor de 0,18 obtido para a razão R/L indica um cordão de solda com baixa convexidade, minimizando as concentrações de tensão no pé do cordão de solda e

evitando a ocorrência de defeitos como a falta de fusão, tornando-o adequado à soldagem de revestimentos.

Tabela 32 - Resumo dos parâmetros importantes no método Taguchi para a razão R/L.

Previsão de η dentro das melhores condições			
Fator de Controle	Nível do Fator	Variação Causada	Erro Padrão
Ur (V)	24	1,64	0,37
T.T	Empurrando	1,21	0,37
Tecimento	Triangular	1,79	0,37
Vs (m/min)	0,2	1,87	0,37
η previsto		16,14	

Ao analisar de forma conjunta a Tabela 28, a Tabela 32 e a Figura 51, pode-se retirar as seguintes informações do uso do método Taguchi com relação à influência dos fatores de controle sobre a razão R/L:

- A Ur influenciou significativamente, os valores da razão R/L. O Nível 3 (24 V) deste fator é o que apresenta os menores valores para a razão R/L, seguido do Nível 2 (22 V) e, por fim, do Nível 1 (20 V), resultado já esperado e condizente com os ensaios preliminares, nos quais maiores valores de Ur proporcionam cordões de solda mais largos e com menores reforços, o que implica em menores valores da razão R/L.
- A técnica da tocha exerce influência significativa sobre esta variável resposta, e o método Taguchi aponta que, para este fator de controle, o Nível 2 (empurrando) proporciona os menores valores para a razão R/L, sucedido pelo Nível 1 (normal) e por último o Nível 3 (puxando). Isso se deve ao fato de que a posição empurrando, conforme explicado anteriormente, proporciona de forma geral cordões de solda mais largos, mas não altera o volume de material depositado por unidade de comprimento, o que resulta em menores reforços e com isso há uma redução nos valores da razão R/L (AWS, 2004).
- O tecimento, além de influenciar significativamente, foi um dos fatores de controle que mais afetou a razão R/L. O método Taguchi aponta o Nível 2 (tecimento triangular) como capaz de proporcionar o menor valor para a razão R/L, o Nível 3 (duplo oito) proporcionaria valores intermediários e o Nível 1 (sem tecimento) apresentaria os piores resultados para este critério, fato já obtido nos ensaios preliminares, no qual se afirma que o uso do tecimento promove uma melhor distribuição do material depositado sobre a peça consequentemente reduzindo a razão R/L (MAGALHÃES, 2008; SCOTTI & PONOMAREV, 2008). E no que

diz respeito ao menor valor da razão R/L apresentada pelo tecimento triangular em relação ao duplo oito, isto se deve ao fato de que, durante a execução do deslocamento da tocha no tecimento triangular, há a permanência do arco durante poucos instantes nas laterais da poça de fusão proporcionando assim um cordão mais largo e com menor reforço (menor R/L).

- A V_s , assim como o tecimento, afetou significativamente, e foi o fator de controle apontado como o que mais influenciou nos valores da razão R/L. O Nível 1 (0,2 m/min) deste fator é indicado para se obter o menor valor da razão R/L, o Nível 2 (0,3 m/min) apresentou um valor intermediário e o Nível 3 (0,4 m/min) apresentou o maior valor da razão R/L, resultado que se deve ao fato de maiores V_s dificultarem uma melhor “molhabilidade” da peça ocasionando um reforço alto e uma largura pequena (maiores valores da razão R/L), conforme já foi abordado nos ensaios preliminares (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

6.2.8 Análise do critério de qualidade DxR/L

Na Tabela 33, a coluna “Variação Causada” mostra que, o fator que mais afetou o critério DxR/L foi a V_s . O teste de confirmação apresentou um valor para DxR/L de 1,2 (Ensaio RC02 na Tabela 30). O intervalo admissível calculado, conforme as equações apresentadas no apêndice I, foi de 0,6 a 1,3. Como o valor do DxR/L obtido no ensaio de confirmação está dentro do intervalo de confiança, conclui-se que o método Taguchi consegue avaliar este critério de qualidade com segurança. Vale destacar que o baixo valor obtido para este critério indica que o compromisso de conseguir os menores valores para os dois critérios anteriores foi alcançado.

Tabela 33 - Resumo dos parâmetros importantes no método Taguchi para DxR/L .

Previsão de η dentro das melhores condições			
Fator de Controle	Nível do Fator	Variação Causada	Erro Padrão
Ur (V)	24	0,52	0,96
T.T	Empurrando	2,48	0,96
Tecimento	Triangular	2,54	0,96
V_s (m/min)	0.2	3,16	0,96
η previsto		0,99	

Avaliando conjuntamente a Tabela 28, a Tabela 33 e a Figura 52, pode-se obter informações do uso do método Taguchi com relação à influência dos fatores de controle sobre o produto DxR/L, apresentadas a seguir:

- A Ur foi o único fator de controle a não influenciar significativamente este critério. Desta forma, qualquer um dos três níveis deste fator pode ser utilizado sem alterar significativamente o valor do produto DxR/L. Embora o método Taguchi indique o Nível 3 (24 V) como forma de alcançar o valor mínimo do produto DxR/L, este nível pode ser substituído sem perdas pelo Nível 1 (20 V), já que este apresentou menores valores de diluição.
- A técnica da tocha apresenta influência significativa, com o Taguchi apontando que, para este fator de controle, o Nível 2 (empurrando) seria o ideal sucedido pelo Nível 1 (normal) e por último o Nível 3 (puxando). Isso se deve ao fato de que as duas parcelas que compõem este critério (diluição e razão R/L) também indicam a posição empurrando como a forma de se obter o seu menor valor.
- O tecimento teve influência significativa sobre este critério. E aponta o Nível 2 (tecimento triangular) como capaz de proporcionar o menor valor para o produto DxR/L, o Nível 3 (duplo oito) proporcionaria valores intermediários e o Nível 1 (sem tecimento) apresentaria os piores resultados para este critério. Este resultado se deve a que ambas as parcelas que compõem este critério apontarem o uso do tecimento triangular como a melhor opção para minimizar o produto DxR/L.
- A Vs, além de influenciar significativamente, foi também o fator de controle que mais afetou os valores do produto DxR/L. O Nível 1 (0,2 m/min) deste fator é indicado para se obter o menor valor da razão DxR/L, o Nível 2 (0,3 m/min) apresentará um valor intermediário e o Nível 3 (0,4 m/min) apresentará o maior valor do produto DxR/L. Assim, como os dois últimos fatores de controle mencionados, a Vs de 0,2 m/min é apontada como a melhor opção para minimizar o produto DxR/L, devido a suas parcelas também indicarem este nível como a melhor opção.

6.3 Matriz ortogonal L9-2

Conforme já justificado na metodologia, a matriz ortogonal L9-2 foi montada com base na matriz L9-1 devido à necessidade de investigar fatores de controle, ainda não explorados nesta matriz. Vale ressaltar que a posição empurrando para a técnica da tocha e o uso tecimento triangular, por minimizarem os três critérios de qualidade (D, R/L e DxR/L) na matriz L9-1, foram utilizados em todos os ensaios da matriz L9-2.

Assim, a sequência de execução das soldagens e os parâmetros utilizados nos ensaios da matriz L9-2, encontram-se descritos na metodologia (Tabela 23). E todos os resultados e análises realizadas com base nestes ensaios serão apresentados com mais detalhes a seguir.

6.3.1 Características geométricas dos cordões

A Tabela 34 mostra os valores da diluição (D), do reforço (R), da largura(L), da razão R/L (R/L) e do produto D \times R/L (D \times R/L) obtidos para cada ensaio da matriz L9-2 cujos fatores de controle foram apresentados na Tabela 23 (página 61). A partir destes dados, pôde-se fazer uma análise usando o método Taguchi para encontrar os melhores parâmetros de soldagem para a aplicação em revestimentos, tendo como base os seguintes critérios de qualidade: diluição, razão R/L e o produto D \times (R/L).

Tabela 34 - Valores das variáveis respostas para a segunda L9.

Amostra	Posição	L (mm)	R (mm)	P (mm)	R/L	D (%)	D \times R/L
R10	Início	14,4	3,2	0,3	0,22	6,9	1,5
R10	Final	14,7	3,3	0,3	0,22	6,8	1,5
R11	Início	13,4	2,3	0,5	0,17	15,1	2,6
R11	Final	13,4	2,0	0,4	0,15	16,5	2,5
R12	Início	9,8	2,6	0,4	0,27	16,4	4,4
R12	Final	9,7	2,2	0,4	0,23	16,5	3,7
R13	Início	12,6	2,7	0,4	0,22	10,1	2,2
R13	Final	12,3	2,7	0,4	0,22	10,2	2,3
R14	Início	10,4	2,4	0,4	0,23	11,5	2,7
R14	Final	10,8	2,4	0,4	0,22	13,9	3,1
R15	Início	15,9	2,9	0,4	0,18	7,2	1,3
R15	Final	16,2	2,8	0,5	0,17	9,9	1,7
R16	Início	8,4	3,4	0,2	0,40	5,4	2,2
R16	Final	8,4	3,5	0,2	0,41	5,3	2,2
R17	Início	17,0	2,9	0,6	0,17	10,5	1,8
R17	Final	16,7	2,8	0,4	0,17	11,1	1,9
R18	Início	10,7	3,2	0,4	0,30	7,4	2,2
R18	Final	10,5	3,2	0,3	0,31	7,7	2,4

6.3.2 Aspecto superficial

Para os ensaios desta matriz, verificou-se que seus cordões de solda de forma geral apresentaram bons aspectos superficiais, houve a presença de poucos respingos e, assim como nos ensaios da matriz L9-1, não foram detectados outros defeitos como mordeduras, trincas, falta de fusão, etc. Deve-se destacar que, nos ensaios com velocidades de soldagem inferiores a 0,4 m/min, para todos os gases de proteção e todas as ligas foram obtidos cordões com elevadas larguras e baixos valores de R/L ideais para operações de revestimento, fato bem exemplificado pelo ensaio R10, cujo aspecto superficial e a seção transversal são mostrados na Figura 53 e na Figura 54 respectivamente. Com relação aos ensaios com $V_s = 0,4$ m/min,

independente da liga ou do gás de proteção, apresentaram cordões de solda irregulares e altos valores de R/L como podem ser vistos na Figura 55 e na Figura 56.

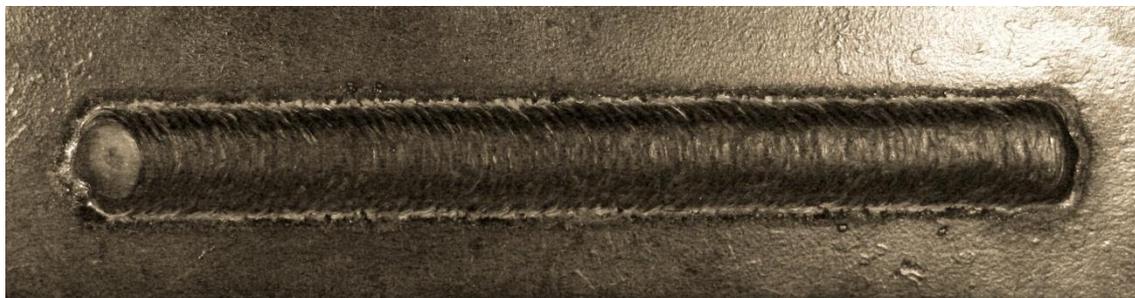


Figura 53 - Aspecto superficial do cordão de solda com Liga=625, Gás=100% Ar, $V_s=0,2$ m/min e $U_r=20$ V (Ensaio R10).



Figura 54 - Seção transversal do cordão de solda com Liga=625, Gás=100% Ar, $V_s=0,2$ m/min e $U_r=20$ V (Ensaio R10).



Figura 55- Aspecto superficial do cordão de solda com Liga=C-276, Gás=100% Ar, $V_s=0,4$ m/min e $U_r=22$ V (Ensaio R16).



Figura 56 - Seção transversal do cordão de solda com Liga=C-276, Gás=100% Ar, $V_s=0,4$ m/min e $U_r=22$ V (Ensaio R16).

6.3.3 Análise de variância no método Taguchi

Com os resultados obtidos referentes às soldagens da matriz ortogonal L9-2 (Tabela 34), foi realizada uma análise estatística de variância no método Taguchi e com isso foram extraídos o nível de significância “ α ” dos fatores de controle sobre a diluição, a razão R/L e o produto DxR/L, os quais são apresentados na Tabela 35. Níveis de significância menores que 0,05 (valores sublinhados e em negrito na Tabela 35) indicam efeitos estatisticamente significativos, ou seja, há uma probabilidade de acerto de 95% em se admitir que este fator de controle esteja influenciando nas variáveis de resposta analisadas.

Tabela 35 - Nível de significância dos fatores de controle sobre as variáveis respostas.

Fator de Controle	Nível de α		
	Diluição	R/L	DxR/L
Liga	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,008</u>
Gás	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,003</u>
Vs (m/min)	<u>0,004</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>
Ur (V)	<u>0,000</u>	<u>0,001</u>	<u>0,002</u>

Com base na Tabela 35 conclui-se que todos os fatores de controle afetaram significativamente todas as variáveis respostas utilizadas como critérios de qualidade (diluição, razão R/L e o produto DxR/L).

6.3.4 Previsão da combinação ótima

A partir dos resultados extraídos da Tabela 34, as variáveis respostas diluição, razão R/L e DxR/L foram avaliadas através de um tratamento estatístico do método Taguchi, no qual estas variáveis são um problema de solução do tipo “quanto menor melhor” (Equação 11) e com isso as condições necessárias para obter os seus valores mínimos são mostrados na Figura 57, na Figura 58 e na Figura 59 respectivamente.

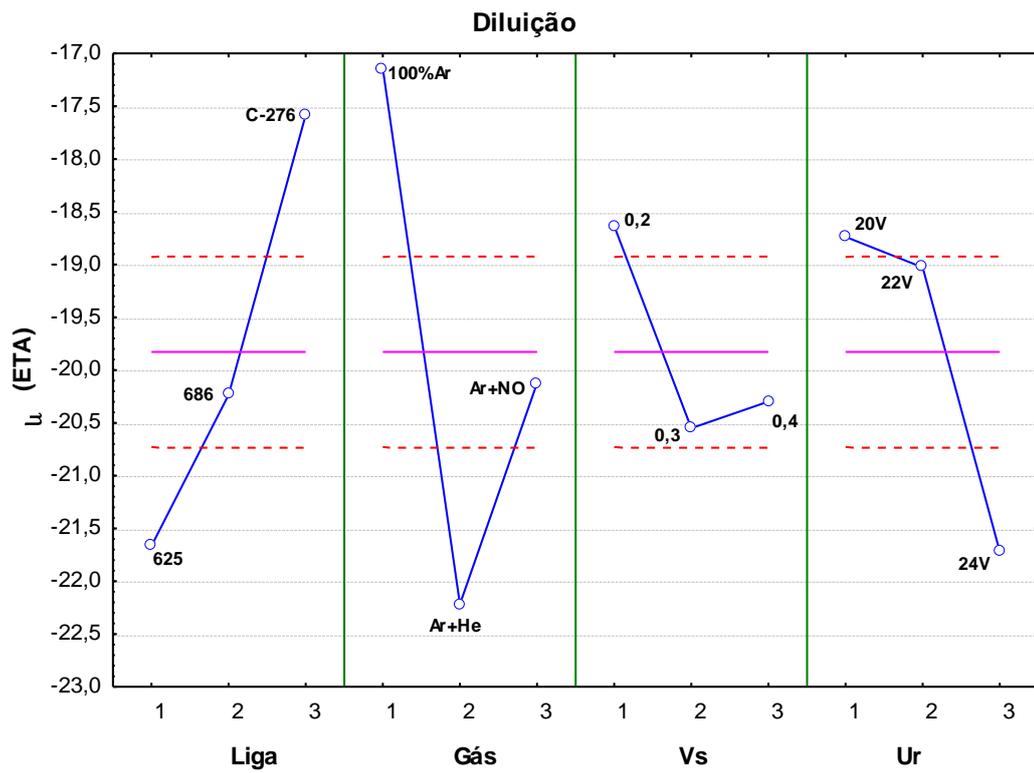


Figura 57 - Influência dos fatores de controle sobre a diluição.

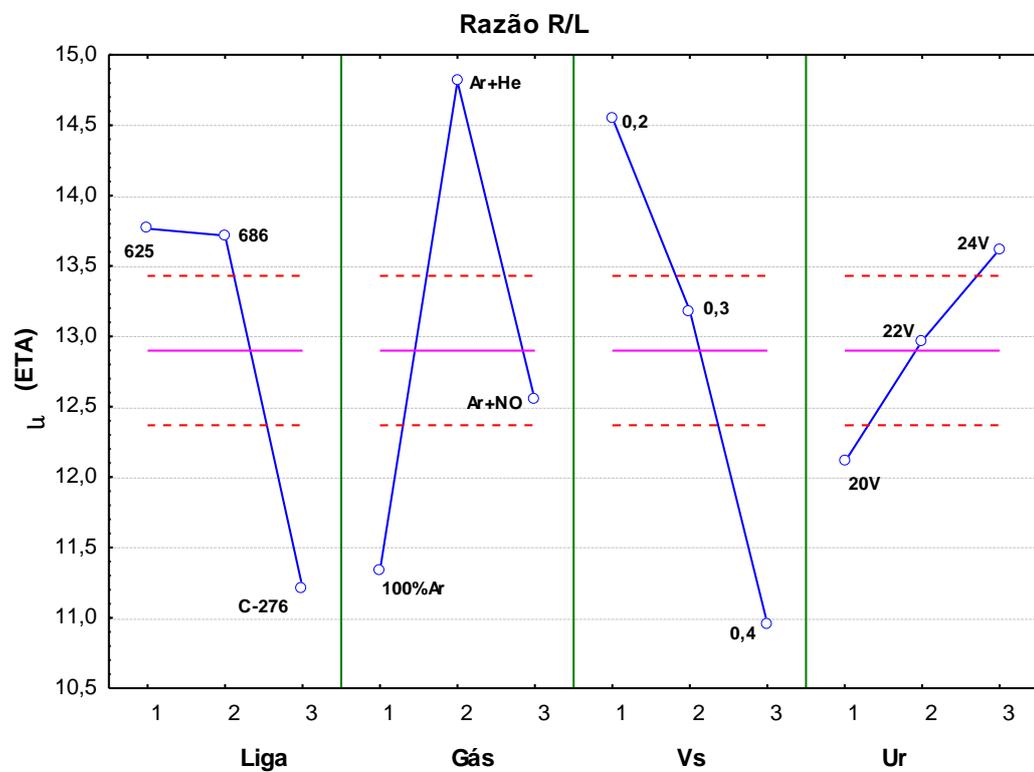


Figura 58 - Influência dos fatores de controle sobre a razão R/L.

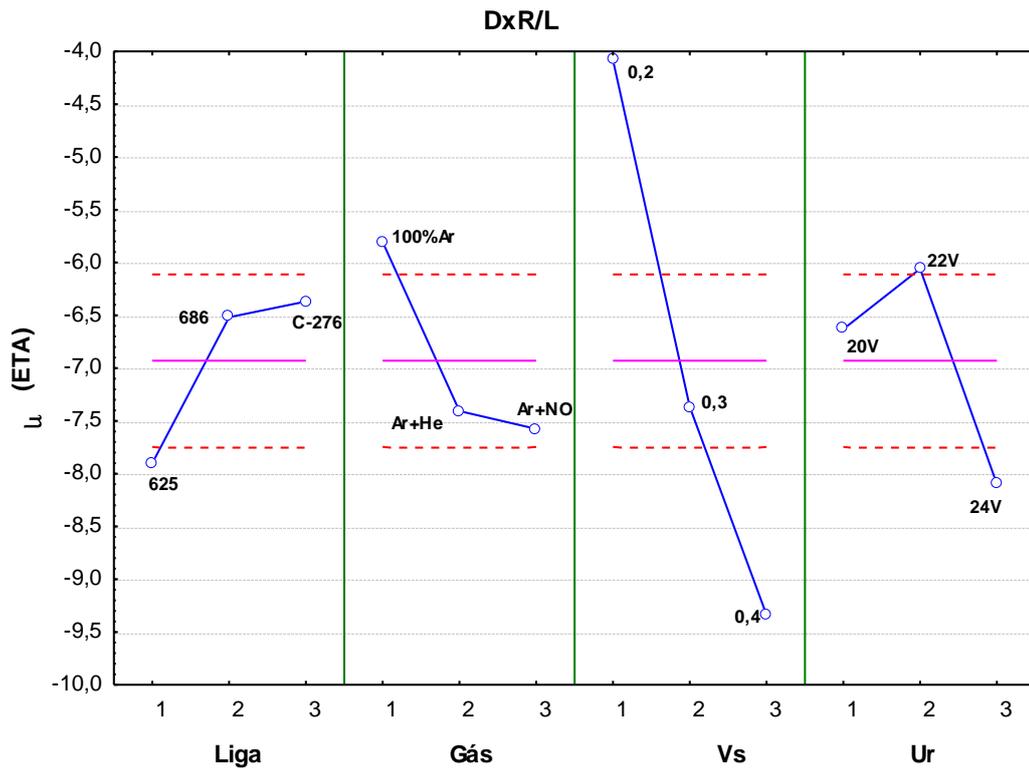


Figura 59 - Influência dos fatores de controle sobre DxR/L.

- Como mostra a Figura 57 a diluição apresenta seu valor mínimo para a combinação de fatores de controle nos níveis “3 1 1 1”, ou seja, a liga C-276 como material de adição, argônio puro como gás de proteção, velocidade de soldagem de 0,2 m/min e uma tensão de referência de 20 V .
- No caso da razão R/L, a Figura 58 indica que seu valor mínimo é dado para a combinação de fatores de controle nos níveis “1 2 1 3”, ou seja, a liga 625 como material de adição, 70% Ar + 30% He como gás de proteção, velocidade de soldagem de 0,2 m/min e uma tensão de referência de 24 V.
- E por fim a Figura 59 aponta que o valor mínimo para o produto DxR/L é obtido para a combinação de fatores de controle nos níveis “3 1 1 2”, ou seja, a liga C-276 como material de adição, argônio puro como gás de proteção, velocidade de soldagem de 0,2 m/min e uma tensão de referência de 22 V.

Ensaio com estas combinações dos níveis dos fatores de controle não foram realizados na Tabela 23 (Capítulo 4) e, por isso, foram necessários ensaios de confirmação para verificar a veracidade de que essas combinações minimizam as variáveis respostas.

6.3.5 Testes de confirmação

A Tabela 36 mostra os valores das variáveis respostas obtidos nas soldagens realizadas com os níveis dos fatores de controle indicados pelos ensaios de confirmação, enquanto a Tabela 37 mostra os valores previstos pelo tratamento estatístico do método Taguchi e os valores reais obtidos nas soldagens denominados nesta tabela de valores medidos.

Tabela 36 - Valores das variáveis respostas dos ensaios de confirmação.

Ensaio	Combinação de fatores	L (mm)	R (mm)	P (mm)	R/L	D (%)	DxR/L
RC03-Início	3 1 1 1	14,6	3,4	0,3	0,23	5,2	1,2
RC03-Final		14,3	3,5	0,3	0,24	5,1	1,2
RC04-Início	1 2 1 3	17,0	2,7	0,6	0,16	12,6	2,0
RC04-Final		17,2	2,5	0,6	0,15	13,2	1,9
RC05-Início	3 1 1 2	15,1	2,8	0,3	0,19	5,3	1,0
RC05-Final		15,0	2,8	0,3	0,19	6,4	1,2

Tabela 37 - Valores previstos e medidos das variáveis respostas para os ensaios de confirmação.

Ensaio	Critério	η (eta)	Valor previsto	Valor medido
RC03	D (%)	-12,61	4,3	5,2
RC04	R/L	18,05	0,13	0,16
RC05	Dx(R/L)	-1,53	1,2	1,1

6.3.6 Análise do critério de qualidade diluição (D)

Conforme pode ser observado pela coluna “Variação Causada” da Tabela 38, os fatores que mais afetaram o valor da diluição foram o Gás e a Liga. O teste de confirmação apresentou uma diluição de 5,2% (Ensaio RC03 na Tabela 37). O intervalo admissível calculado com base nas equações mostradas no apêndice I foi de 3,0 a 5,8%. Como o valor da diluição obtida pelo ensaio de confirmação está dentro do intervalo de confiança, conclui-se que este critério de qualidade pode ser avaliado com segurança pelo método Taguchi. Assim como na matriz L9-1, o valor de diluição obtido por este ensaio o torna adequado para as soldagens de revestimento (conforme a norma ISO 10423).

Tabela 38 - Resumo dos parâmetros importantes no método Taguchi para a diluição.

Previsão de η dentro das melhores condições			
Fator de Controle	Nível do Fator	Varição Causada	Erro Padrão
Liga	C-276	2,24	0,45
Gás	100% Ar	2,69	0,45
Vs (m/min)	0,2	1,19	0,45
Ur (V)	20	1,09	0,45
η previsto		-12,61	

Através de uma análise conjunta da Figura 57, da Tabela 35 e da Tabela 38, chega-se as seguintes informações da aplicação do método Taguchi com relação à influência dos fatores de controle sobre a diluição:

- A liga teve influência significativa sobre este critério, com o Taguchi apontando o Nível 3 (C-276) como a melhor opção para obter o valor mínimo da diluição, seguido pelo Nível 2 (686) e, por fim, pelo Nível 1 (625) que obteria os maiores valores. Acredita-se que este fato se deva à menor molhabilidade observada nos ensaios utilizando a liga C-276 em comparação com as outras ligas, o que faz com que o arco elétrico haja sobre o excessivo reforço do cordão de solda ao invés de atingir diretamente o metal de base, consequentemente reduzindo a área fundida e com isso obtêm-se menores valores de diluição. Mas vale lembrar que a escolha da liga foi baseada apenas nas características geométricas, assim a escolha final da liga adequada para soldagens de revestimento será feita com base na resistência à corrosão, resistência ao desgaste e nas propriedades mecânicas destas ligas, cujos ensaios ficam como sugestão para trabalhos futuros.
- O gás de proteção afetou significativamente e foi o fator de controle que mais influenciou no valor da diluição. O Nível 1 (100% Ar) é apontado como o nível capaz de obter o valor mínimo para a diluição, o Nível 3 (99,97% Ar + 0,03% NO) apresentaria valores intermediários e, por fim, o Nível 2 (70%Ar + 30%He) apresentaria os maiores valores para a diluição, pois a mistura 70%Ar + 30%He, contém hélio, cujo alto potencial de ionização proporciona uma maior tensão do arco elétrico, o que, por sua vez, resulta em maiores aportes térmicos e, com isso, maiores diluições (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).
- A Vs teve influência significativa sobre este critério e de forma idêntica a apresentada e discutida nos resultados da matriz L9-1, o Nível 1 (0,2 m/min) é apontado como o nível que minimiza o valor da diluição.

- A Ur também mostrou ser significativamente influente e apontou o Nível 1 (20 V) como o melhor nível para obtenção dos valores mínimos da diluição, fato semelhante ao já apresentado e discutido nos resultados referentes à matriz L9-1.

6.3.7 Análise do critério de qualidade R/L

Conforme pode ser observado pela coluna “Variação Causada” da Tabela 39, os fatores com maior efeito sobre a razão R/L foram o Gás e a Vs. O teste de confirmação apresentou uma razão R/L de 0,16 (ensaio RC04 na Tabela 37). O intervalo admissível calculado para este critério segundo as equações descritas no apêndice I foi de 0,14 a 0,18. Como o valor obtido pelo ensaio de confirmação está dentro do intervalo de confiança, conclui-se que o método Taguchi consegue avaliar a razão R/L com segurança. Assim como na matriz L9-1, o valor de 0,16 obtido para a razão R/L indica um cordão de solda com baixa convexidade, minimizando as concentrações de tensão no pé do cordão de solda e evitando a ocorrência de defeitos como a falta de fusão, tornando-o adequado à soldagem de revestimentos.

Tabela 39 - Resumo dos parâmetros importantes no método Taguchi para a razão R/L.

Previsão de η dentro das melhores condições			
Fator de Controle	Nível do Fator	Variação Causada	Erro Padrão
Liga	625	0,87	0,27
Gás	70% Ar+30% He	1,91	0,27
Vs (m/min)	0,2	1,65	0,27
Ur (V)	24	0,72	0,27
η previsto		18,05	

Com base na Figura 58, na Tabela 35 e na Tabela 39, pode-se extrair os seguintes dados do uso do método Taguchi com relação à influência dos fatores de controle sobre a razão R/L:

- A liga apresentou influência significativa sobre o valor da razão R/L, com o Nível 1 (625) sendo apontado como o nível capaz de minimizar o valor deste critério, obtendo o Nível 2 (686) valores intermediários e o Nível 3 obteria os maiores valores. Este resultado, assim como no critério diluição, acredita-se estar associado à baixa molhabilidade dos cordões de solda obtidos com a liga C-276, o que acarretou em os cordões de solda com reforços excessivos e estreitos, ou seja, elevados valores para a razão R/L. Já as ligas 625 e 686 apresentaram um comportamento similar para geometria de seus cordões, onde foram obtidos cordões largos e com pequeno reforço, ou seja, baixos valores de R/L.

- O gás de proteção, além de influenciar significativamente, foi também o fator de controle que mais afetou a razão R/L. O Nível 2 (70%Ar+30%He) é apontado como nível que minimiza os valores da razão R/L, sucedido pelo Nível 3 (99,97% Ar + 0,03% NO) e por último, pelo Nível 1 (100%Ar), resultado condizente com a literatura, que atribui ao gás hélio, presente na mistura 70%Ar+30%He, uma maior capacidade de trocar calor com a chapa a ser soldada, aumentando a fluidez da poça de fusão e melhorando a sua molhabilidade, o que resulta em cordões de solda mais largos (maior região fundida) e com baixos níveis de reforço quando comparados aos obtidos com o uso do argônio puro como gás de proteção (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).
- Com relação à V_s e U_r verificou-se que estes fatores de controle exercem influência significativa sobre a razão R/L; e demonstraram comportamentos idênticos aos apresentados e discutidos nos resultados obtidos para a matriz L9-1 em que o taguchi aponta o Nível 1 ($V_s= 0,2$ m/min e $U_r= 24$ V) para ambos os fatores, como sendo os níveis capazes de alcançar o menor valor para a razão R/L.

6.3.8 Análise do critério de qualidade DxR/L

Na coluna “Variação Causada” da Tabela 40, observa-se que o fator que mais afetou o critério DxR/L foi a V_s . O teste de confirmação apresentou um valor para DxR/L de 1,1 (Ensaio RC05 na Tabela 37). O intervalo admissível calculado através das equações mostradas no apêndice I foi de 0,6 a 1,3. Como o valor do DxR/L obtido no ensaio de confirmação está dentro do intervalo de confiança, conclui-se que o método Taguchi consegue avaliar este critério de qualidade com segurança. O baixo valor obtido para este critério mostra que o consenso entre os menores valores para os dois critérios anteriores foi alcançado, o que aconteceu de forma semelhante ao apresentado para este critério nos resultados referentes à matriz L9-1.

Tabela 40 - Resumo dos parâmetros importantes no método Taguchi para o DxR/L .

Previsão de η dentro das melhores condições			
Fator de Controle	Nível do Fator	Variação Causada	Erro Padrão
Liga	C-276	0,56	0,41
Gás	100%Ar	1,12	0,41
V_s (m/min)	0,2	2,85	0,41
U_r (V)	22	0,87	0,41
η previsto		-1,53	

Baseado numa análise conjunta da Figura 59, da Tabela 35 e da Tabela 40, é possível obter os seguintes dados da aplicação do método Taguchi com relação à influência dos fatores de controle sobre o produto DxR/L:

- Assim como nos critérios anteriores, a liga demonstrou ter influência significativa sobre o produto DxR/L, indicando, como a melhor opção para minimizar este critério, o Nível 3 (C-276), sucedido pelo Nível 2 (686) e pelo Nível 1 (625) na sequência, fato que se deve à primeira parcela que compõe o produto DxR/L sofrer uma maior influência deste fator de controle que a segunda parcela, ou seja, a liga exerce uma influência muito maior sobre a diluição que na razão R/L.
- O gás de proteção exerceu influência significativa sobre este critério, e o Nível 1 (100% Ar) foi indicado como o nível capaz de alcançar o valor mínimo, sucedido pelo Nível 2 (70% Ar + 30% He) que apresentaria valores intermediários e pelo Nível 3 (99,97% Ar + 0,03% NO) que apresentaria os maiores valores para o produto DxR/L, fato que pode ser explicado pela maior influência exercida pelo gás de proteção sobre a primeira parcela (diluição) do produto DxR/L que a influência exercida por este fator na segunda parcela (R/L).
- A Vs apresenta influência significativa sobre o produto DxR/L, e o Nível 1 (0,2 m/min) é apontado como o nível que minimiza o valor deste critério, com o Nível 2 (0,3 m/min) apresentando um valor intermediário e o Nível 3 (0,4 m/min) apresentará o maior valor do produto DxR/L, resultado que pode ser explicado pelo fato de que as duas parcelas que constituem o produto DxR/L indicarem o Nível 1 como a melhor opção para minimizar este critério.
- A Ur exerce influência significativa sobre o produto DxR/L e o Nível 2 (22 V) é indicado como o nível capaz de obter o valor mínimo para este critério, seguido pelo Nível 1 (20 V) e, por último, pelo Nível 3 (24 V), fato difícil de explicar, já que nenhuma das duas parcelas que compõem este critério apontam o Nível 2 como solução, mas ao analisar com cuidado a Tabela 34, verifica-se que este nível apresentou de forma geral os menores valores para o produto DxR/L.

6.4 Custos de soldagem

Embora os ensaios escolhidos pelo método Taguchi nas duas matrizes ortogonais tenham atendido os critérios de qualidade estabelecidos, ou seja, baixos valores para a diluição, para a razão R/L e para o produto DxR/L, os cordões de solda para estes ensaios apresentaram um aspecto negativo que foram os baixos valores dos reforços que, de forma

geral, ficaram abaixo de 4 mm, fato que caracteriza um problema, pois, como nenhum dos ensaios apontados pelo Taguchi atende à exigência de 5 mm para o reforço bruto, são necessárias no mínimo duas camadas, fazendo recair sobre o custo a decisão de qual combinação dos níveis dos fatores de controle deveriam ser utilizados para realização das soldagens de revestimento, já que, na maioria das vezes, o custo final de um produto ou serviço é um fator determinante para se tomar decisões no âmbito da engenharia.

A Tabela 41 apresenta os valores da taxa de fusão (TF), da taxa de deposição (TD) e da eficiência de deposição (ED) obtidos para cada ensaio, as quais foram calculadas através da Equação 2, da Equação 3 e da Equação 4 respectivamente. Esta tabela mostra ainda os valores da massa do corpo de prova antes da soldagem (P1), a massa do corpo de prova após a soldagem (P2) e a diferença entre as massas (ΔP).

Tabela 41 - Valores obtidos para a TD, TF e ED.

Ensaio	P1 (g)	P2 (g)	ΔP (g)	TD (kg/h)	TF (kg/h)	ED %
R01	1044,4	1076,0	31,6	2,9	3,0	96,8
R02	1034,4	1055,1	20,7	2,9	3,0	94,8
R03	1039,9	1055,6	15,7	2,9	3,1	95,1
R04	1099,9	1115,7	15,8	2,9	3,1	95,7
R05	1022,9	1054,1	31,2	2,9	3,0	95,7
R06	1050,5	1072,5	20,8	2,9	3,0	95,2
R07	1047,5	1068,4	20,9	2,9	3,0	95,7
R08	1052,6	1068,6	16,0	3,0	3,1	96,9
R09	1024,4	1055,8	31,4	2,9	3,0	96,3
R10	1001,9	1032,8	30,9	2,9	3,0	94,8
R11	996,1	1016,6	20,5	2,8	3,0	93,9
R12	1004,3	1019,8	15,5	2,9	3,1	93,9
R13	976,0	997,5	21,5	3,0	3,0	98,0
R14	990,9	1007,0	16,1	3,0	3,1	97,5
R15	994,5	1026,7	32,2	3,0	3,0	99,1
R16	981,5	996,7	15,2	2,8	3,1	92,1
R17	1025,2	1055,8	30,6	2,8	3,0	93,9
R18	1037,2	1057,0	19,8	2,7	3,0	90,6
RC01	994,0	1025,1	31,1	2,9	3,0	95,4
RC02	963,8	994,4	30,6	2,8	3,0	93,9
RC03	1023,8	1054,6	30,8	2,8	3,0	94,8
RC04	959,0	990,8	31,8	2,9	3,1	95,6
RC05	968,9	999,8	30,9	2,9	3,1	93,6

Com os resultados da Tabela 41 e os dados relacionados abaixo, os custos diretos da soldagem MIG/MAG, em R\$/kg de solda, foram calculados de acordo com as equações 5 a 10, apresentadas na revisão bibliográfica e encontram-se listados na Tabela 42.

- Custo unitário do gás (G):
 - Argônio puro: 31,58 R\$/m³;
 - 70% de argônio + 30% de hélio: 45,00 R\$/m³;
 - 99,97% de argônio + 0,03 % de óxido nítrico: 35,00 R\$/m³;
- Vazão do gás (F): 1,5 m³/h;
- Custo da energia (P): 0,56 R\$/kWh;
- Custo da arme-eletrodo (M):
 - AWS ER NiCrMo-3 (625): 217,90 R\$/kg;
 - AWS ER NiCrMo-4 (C-276): 317,31 R\$/kg;
 - AWS ER NiCrMo-14 (686): 564,43 R\$/kg;
- Salário do soldador (S): 10 R\$/h;
- Fator de operação (K): 50%;
- Custos gerais (O): 1 R\$/h.

Tabela 42 - Custos diretos da soldagem para cada ensaio.

Ensaio	Custo gás (R\$/kg)	Custo energia (R\$/kg)	Custo materiais (R\$/kg)	Custo Trabalho (R\$/kg)	Custos gerais (R\$/kg)	Custo direto total (R\$/kg)
R01	16,24	0,58	225,02	1,71	0,69	244,24
R02	16,53	0,55	229,94	1,74	0,70	249,46
R03	16,34	0,56	229,17	1,73	0,69	248,48
R04	16,24	0,58	227,72	1,71	0,69	246,94
R05	16,45	0,60	227,64	1,74	0,69	247,11
R06	16,45	0,57	228,84	1,74	0,69	248,29
R07	16,37	0,59	227,74	1,73	0,69	247,12
R08	16,04	0,55	224,87	1,69	0,68	243,83
R09	16,34	0,58	226,19	1,73	0,69	245,52
R10	16,61	0,60	229,85	1,75	0,70	249,50
R11	23,78	0,69	232,19	1,76	0,70	259,13
R12	18,35	0,63	232,13	1,75	0,70	253,55
R13	15,91	0,59	575,72	1,68	0,67	594,58
R14	22,71	0,61	578,87	1,68	0,67	604,55
R15	17,66	0,61	569,83	1,68	0,67	590,45
R16	16,88	0,57	344,70	1,78	0,71	364,65
R17	23,90	0,70	337,99	1,77	0,71	365,06
R18	19,15	0,56	350,07	1,82	0,73	372,33
RC01	31,35	0,59	228,37	1,74	0,70	262,75
RC02	31,86	0,65	232,10	1,77	0,71	267,09
RC03	16,66	0,56	334,91	1,76	0,70	354,59
RC04	23,00	0,62	228,05	1,70	0,68	254,06
RC05	16,61	0,53	339,12	1,75	0,70	358,72

Para a determinação do custo direto total da soldagem de revestimento, foi necessário conhecer o número de passes “n” e o tempo de soldagem contínua. O número de passes “n” para um revestimento com largura total “LT”, produzido por um cordão de solda de largura “L”, (Figura 60), foi determinado pela Equação 18, enquanto que o tempo de soldagem contínua para a realização do revestimento foi determinado pela Equação 19.

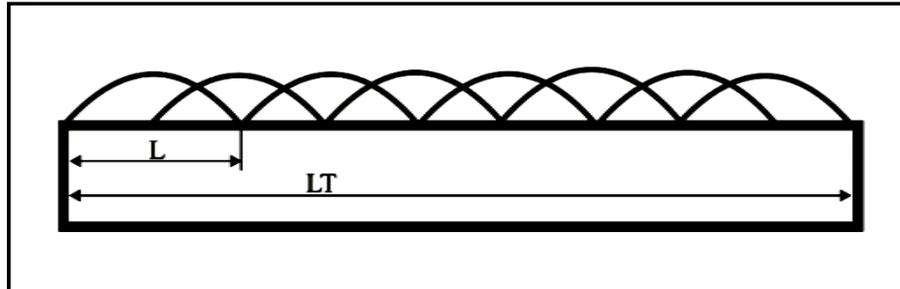


Figura 60 - Esquema de um revestimento com largura LT produzido por um cordão de solda de largura L, considerando uma sobreposição de 50% (L/2).

$$n = \frac{2 \times LT - L}{L} \quad \text{Equação 18}$$

$$t_T = \left[\frac{C}{V_S} \times \left(\frac{2 \times LT - L}{L} \right) \right] \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

t_T = tempo total de soldagem contínua;

C = comprimento do cordão de solda;

V_S = velocidade de soldagem.

Como o reforço bruto do revestimento deve ter no mínimo 5 mm de altura e considerando que o reforço máximo obtido nos cordões individuais dos ensaios para as duas matrizes ortogonais foi de 4,0 mm (Ensaio R3), conclui-se que os revestimentos devem ter no mínimo duas camadas. Contudo a altura final de um revestimento com mais de uma camada não é simplesmente a soma do reforço do cordão isolado, pois dois fenômenos contribuem para a sua altura final. O primeiro se refere à diferença de molhabilidade do metal de solda no substrato, pois, na primeira camada o substrato é o aço ASTM A 516 Gr 60, enquanto na segunda, é o próprio material do metal de solda que proporciona uma maior molhabilidade, resultando num cordão de solda mais largo e com um reforço menor. O outro fenômeno envolvido é relativo ao efeito da sobreposição (50% neste trabalho) dos cordões que proporciona um aumento da altura do revestimento à medida que esta aumenta. Assim a título de comparação, não foi considerado o efeito destes dois fenômenos. Desta forma, o custo

direto total do revestimento (Custo), considerando a soldagem contínua para cada ensaio foi determinado pela multiplicação do custo direto total pelo tempo total de soldagem contínua (t_T) e pela taxa de deposição (TD). A Tabela 43 apresenta os valores previstos de algumas variáveis (diluição, reforço, número de passes, o tempo total de soldagem contínua e custo direto total do revestimento) em cada ensaio para a primeira camada (variáveis com índice subscrito 1) e para a segunda camada (variáveis com índice subscrito 2). Tendo em vista que um revestimento com uma terceira camada seria muito oneroso, não foi feita uma previsão das variáveis para esta condição.

Tabela 43 - Valores previstos para: a diluição (D), o reforço (R), o número de passes (n), o tempo total de soldagem contínua (t_T) e o custo direto total do revestimento (Custo).

Ensaio	1ª camada					2ª camada				
	D ₁ (%)	R ₁ (mm)	n ₁	t _{T1} (min)	Custo ₁ (R\$)	D ₂ (%)	R ₂ (mm)	t _{T2} (min)	n ₂	Custo ₂ (R\$)
R01	6,1	3,5	21	13,7	162,28	0,4	7,0	27,3	42	324,56
R02	6,0	2,8	17	7,5	89,15	0,4	5,6	15,0	34	178,31
R03	6,4	4,0	29	9,4	113,08	0,4	8,1	18,8	58	226,15
R04	7,6	2,8	23	7,6	91,38	0,6	5,6	15,2	46	182,75
R05	6,2	3,2	13	8,2	97,47	0,4	6,4	16,4	26	194,94
R06	10,4	3,5	28	12,3	146,62	1,1	7,0	24,6	56	293,23
R07	12,5	2,5	16	7,1	84,23	1,6	5,0	14,1	32	168,46
R08	7,0	2,9	29	9,4	113,34	0,5	5,7	18,9	58	226,69
R09	7,0	3,2	13	8,3	98,77	0,5	6,5	16,7	26	197,55
R10	6,8	3,2	13	8,3	98,34	0,5	6,5	16,6	26	196,68
R11	15,8	2,1	14	6,0	74,00	2,5	4,2	12,1	28	148,00
R12	16,5	2,4	20	6,4	76,77	2,7	4,8	12,7	40	153,54
R13	10,2	2,7	15	6,5	192,65	1,0	5,5	13,1	30	385,31
R14	12,7	2,4	18	5,8	173,57	1,6	4,8	11,6	36	347,13
R15	8,6	2,8	11	7,5	218,35	0,7	5,6	14,9	22	436,70
R16	5,4	3,4	23	7,4	126,74	0,3	6,8	14,9	46	253,48
R17	10,8	2,8	11	7,1	121,58	1,2	5,7	14,2	22	243,16
R18	7,9	2,9	11	5,0	84,61	0,6	5,8	10,0	22	169,21
RC01	5,7	3,1	12	8,0	100,38	0,3	6,2	16,0	24	200,77
RC02	7,0	2,9	11	7,4	93,16	0,5	5,8	14,8	22	186,33
RC03	5,2	3,5	13	8,3	140,03	0,3	6,9	16,7	26	280,06
RC04	12,9	2,6	11	7,0	86,58	1,7	5,2	13,9	22	173,16
RC05	5,8	2,8	12	8,0	135,83	0,3	5,6	15,9	24	271,65

Com base nos resultados mostrados na Tabela 43, foi montada a Figura 61 que nos mostra graficamente os custos (C_{2}), os reforços (R_{2}) e as diluições (D_{2}) previstos para duas camadas em função do ensaio e, nesta figura, foi traçada uma linha de referência em um reforço de 5 mm, para escolha dos ensaios que satisfazem ou se aproximam desta condição. Assim, conforme esta figura, apenas os ensaios R7, R11, R12 e RC4 proporcionam reforços próximos ao valor de referência e com custos aceitáveis.

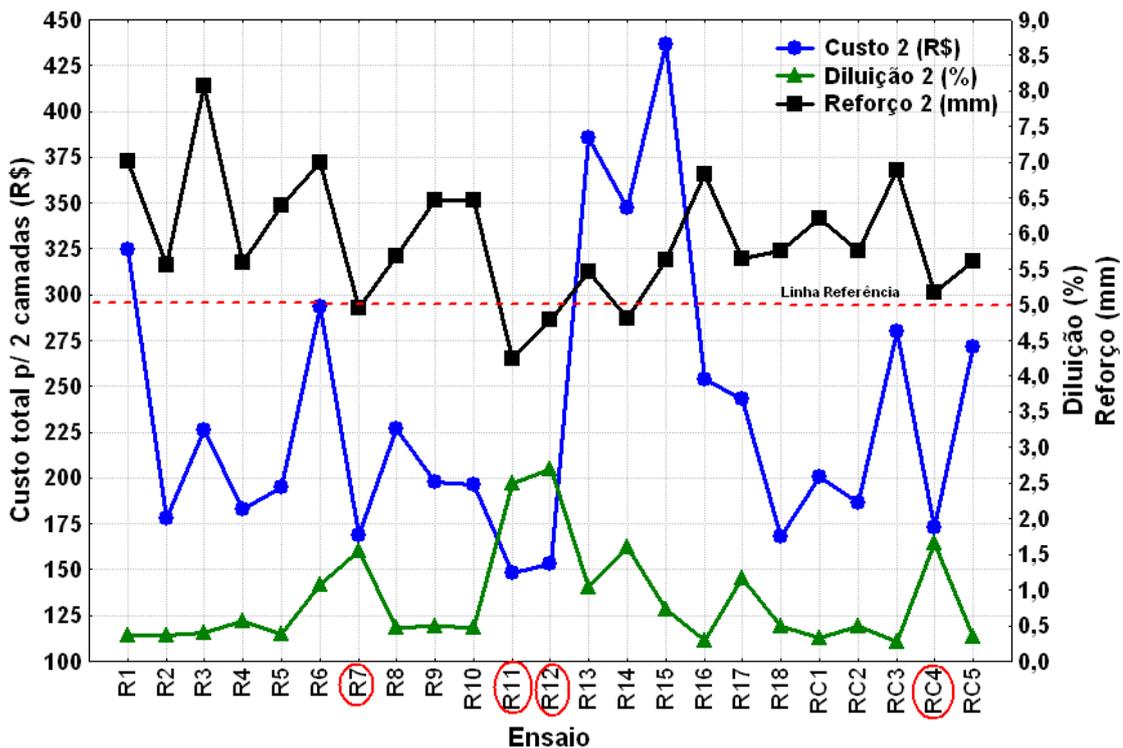


Figura 61 - Custo total, reforço e diluição previstos para duas camadas em função dos ensaios.

Em todos os quatro ensaios pré-selecionados (R7, R11, R12 e RC4), o material de adição utilizado, foi a liga 625, que apresenta um custo do arame-eletrodo muito inferior às demais ligas (C-276 e 686). Assim a escolha do material de adição para aplicação do revestimento ficou restrita somente à liga 625, pois os custos foram calculados com base apenas nos custos relativos à soldagem sem levar em consideração os custos relativos à corrosão. Contudo vale ressaltar que as operações de revestimento na indústria de petróleo e gás natural são utilizadas de forma geral para melhorar resistência à corrosão dos equipamentos e componentes. Desse modo, uma escolha mais rigorosa da liga deve incluir também ensaios de corrosão para comparar os custos relacionados ao desgaste por corrosão destas ligas na vida útil dos revestimentos. Os cálculos dos custos relacionados à corrosão ficam como uma sugestão para trabalhos futuros.

A Tabela 44 apresenta de forma mais detalhada os valores previstos para o custo, o reforço e a diluição dos ensaios pré-selecionados para execução das soldagens relativas aos ensaios de revestimentos.

Tabela 44 - Valores do reforço, do custo e da diluição para os ensaios pré-selecionados para o revestimento.

Ensaio	R ₂ (mm)	D ₂ (%)	Custo ₂ (R\$)
R07	5,0	1,6	168,46
R11	4,2	2,5	148,00
R12	4,8	2,7	153,54
RC04	5,2	1,7	173,16

Ao analisar-se a Tabela 44, verifica-se que os quatro ensaios pré-selecionados obtiveram baixos valores de diluição, inferiores a 3%, tornando-os aptos à soldagem dos revestimentos. Então para decidir o ensaio adequado, foi utilizado o critério do menor custo, o que leva a escolha do Ensaio R11. Como uma alternativa, caso o ensaio R11 não atenda ao valor mínimo desejado para o reforço (aproximadamente 5 mm), pode ser utilizado o Ensaio R12, que se destaca por apresentar um custo apenas 3,6% maior que o Ensaio R11.

6.5 Etapa 3 - Soldagem de revestimento

A soldagem do revestimento, denominada de ensaio RV01, foi realizada utilizando a combinação dos níveis para os fatores de controle indicados pelo ensaio R11 e foi feita conforme o procedimento descrito na metodologia referente a esta etapa. Os parâmetros de soldagem utilizados e os principais resultados obtidos para o revestimento encontram-se expostos na Tabela 45.

Tabela 45 – Parâmetros e características geométricas da soldagem de revestimento.

Ensaio	Ensaio de Referência	Liga	Gás	Vs (m/min)	Ur (V)	n	Nº de camadas	LT (mm)	D ₂ (%)	R ₂ (mm)
RV01	R11	625	70% Ar + 30%He	0,3	22	9	2	60,2	1,46	5,2

Obs: n = número de passes necessários para realização de uma camada de revestimento.

D₂ = Diluição do revestimento para a segunda camada

R₂ = Reforço do revestimento para a segunda camada

Conforme pode ser visto na Figura 62, o revestimento obtido no ensaio RV01 apresentou bom acabamento superficial, atendendo satisfatoriamente ao primeiro critério estabelecido na metodologia (página 64). A Figura 63 mostra a seção transversal do revestimento de onde foram obtidos os resultados referentes à geometria das camadas soldadas e através da qual se constata a ausência de trincas, falta de fusão e vazios entre os cordões, o que satisfaz o terceiro critério imposto na metodologia. O reforço obtido para o revestimento com duas camadas foi de 5,2 mm atendendo também ao critério do reforço mínimo (PETROBRAS N -1707, 1999). Assim os parâmetros de soldagem escolhidos através do método Taguchi e dos custos de soldagem mostraram-se aptos para obter um bom revestimento.

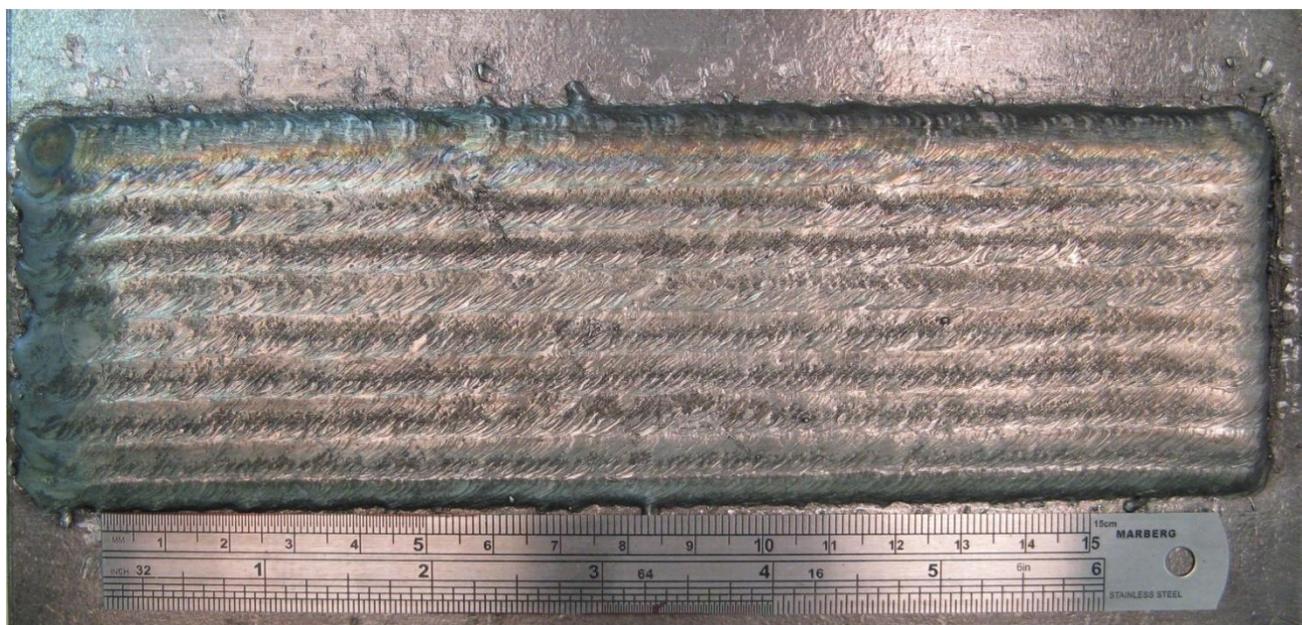


Figura 62 - Aspecto superficial da camada de revestimento referente ao Ensaio RV01.



Figura 63 - Seção transversal da camada de revestimento referente ao Ensaio RV01.

Na Figura 64 e na Figura 65, são mostrados os oscilogramas de tensão e corrente para os cordões depositados na primeira e segunda camada respectivamente.

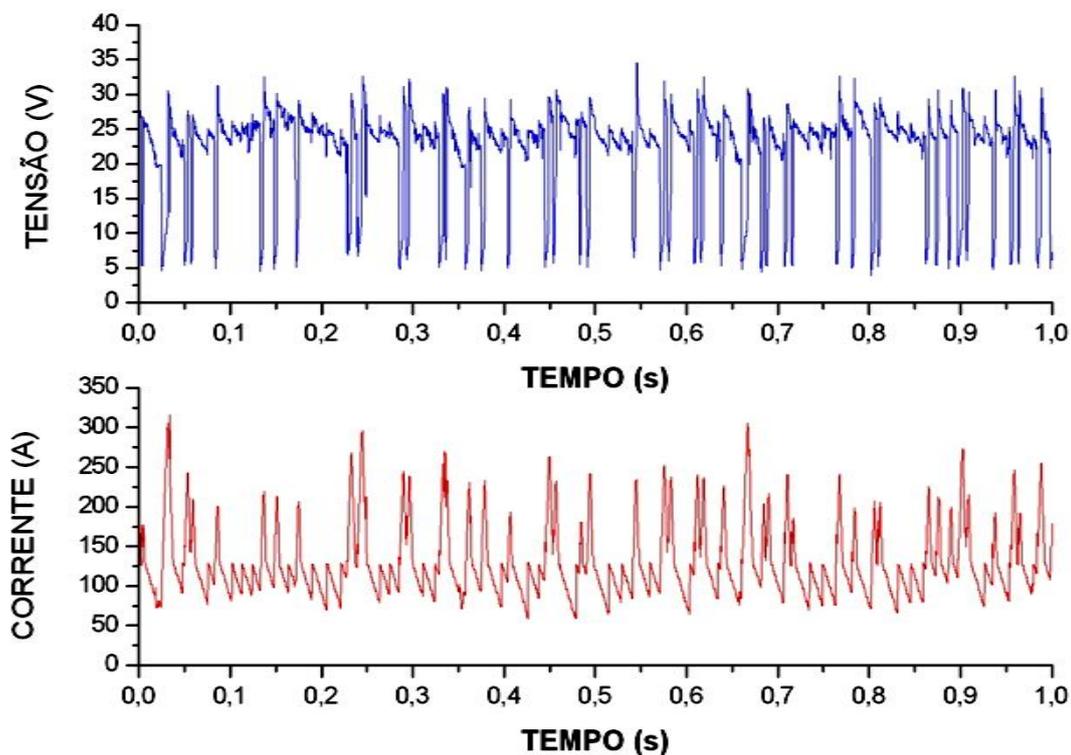


Figura 64 - Oscilograma de tensão e corrente para primeira camada do revestimento.

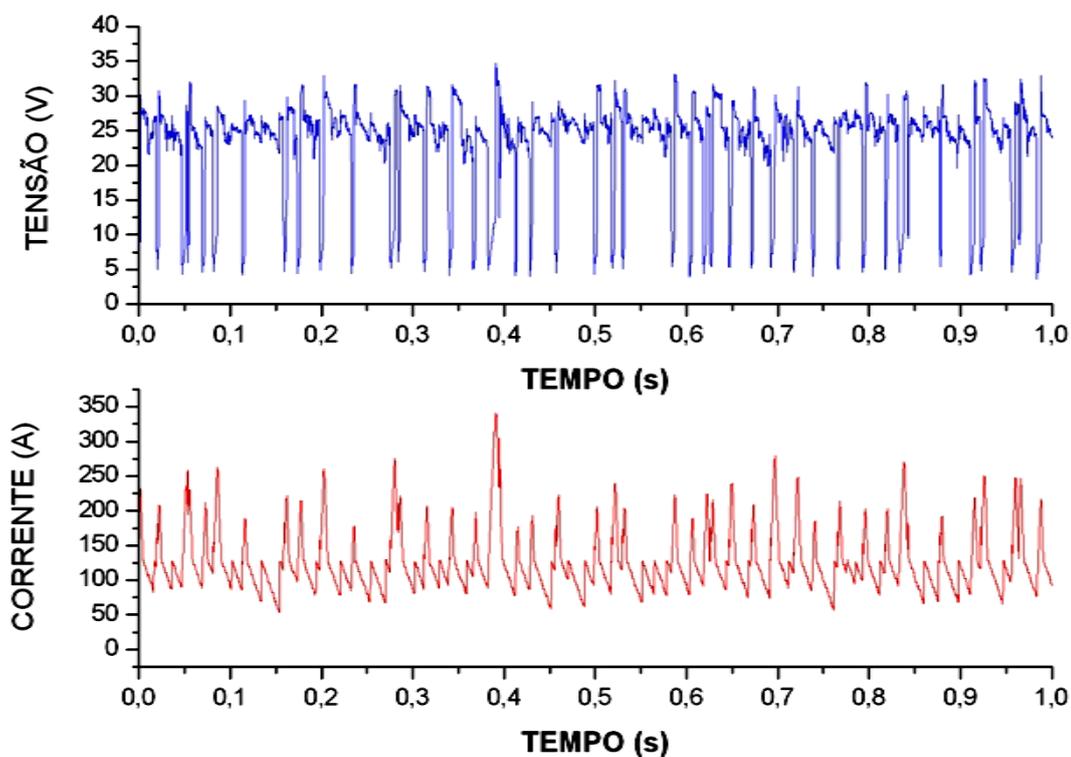


Figura 65 - Oscilograma de tensão e corrente para segunda camada do revestimento.

CAPÍTULO VII

ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS

7. Análise geral dos resultados

Com base nos resultados experimentais apresentados neste trabalho foi possível fazer as seguintes considerações finais:

- Os menores níveis para a tensão de referência e a velocidade de soldagem ($U_r = 20$ V e $V_s = 0,2$ m/min) obtiveram os menores valores de diluição.
- O uso do tecimento apesar de não afetar significativamente a diluição, é um parâmetro essencial para a obtenção de baixos valores da razão R/L.
- A liga (material de adição) e o gás de proteção demonstraram serem parâmetros capazes de alterar significativamente as características geométricas dos cordões de solda, em que a liga C-276 e o gás 100%Ar obtiveram os menores valores de diluição, em contrapartida obteve os maiores valores para a razão R/L.
- O uso do método Taguchi foi uma ferramenta estatística muito útil, pois permitiu, sem prejuízos com um reduzido número de ensaios obter as combinações dos fatores de controle ideais para cada critério de qualidade adotado.
- Todas as combinações dos fatores de controle conduziram a soldagens de revestimento com uma camada, as quais, apesar de atenderem os critérios de qualidade, obteriam um reforço dos cordões de solda inferiores a 4 mm, sendo necessária a aplicação de uma segunda para atender à exigência de 5 mm de reforço bruto da norma N-1707 (PETROBRAS).
- Faz-se necessário o uso das características econômicas (custo) para avaliar e selecionar os parâmetros de soldagem para revestimento com duas camadas.
- Os parâmetros de soldagem utilizados no ensaio R11 (Liga = 625, Gás = 70% Ar+30% He, $V_s = 0,3$ m/min e $U_r = 22$ V) obtiveram o menor custo para o revestimento com duas camadas (R\$ 148,00) e um reforço compatível com o mínimo exigido na norma N-1707.
- Através do revestimento realizado, foi possível constatar que o uso do processo MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito é capaz de atender aos requisitos exigidos: bom aspecto superficial e isento de defeitos.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES

8. Conclusões

- O estudo dos parâmetros de soldagem para processo MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito realizado neste trabalho permitiu avaliar e selecionar os parâmetros ótimos para obtenção das características geométricas desejadas para soldagem de revestimento.
- O processo MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito proporcionou cordões de solda com baixos valores de diluição e razões R/L e com um bom acabamento superficial.
- E por fim os parâmetros de soldagem selecionados demonstram ser viáveis para obtenção de um revestimento com um bom acabamento superficial e isento de defeitos (falta de fusão, vazios entre os cordões, trincas, etc.)

CAPÍTULO IX

Sugestões para trabalhos futuros

9. Sugestões

- Explorar outros tipos de transferência metálica e outros modos de operação da fonte (Corrente constante), bem como várias formas de onda para a corrente de soldagem;
- Realizar uma caracterização metalúrgica do revestimento, ou seja, caracterizar a microestrutura apresentada pela ZAC, o metal de solda e a interface revestimento/substrato;
- Avaliar as propriedades mecânicas dos revestimentos, através de ensaios de arrancamento, microdureza e ensaios de desgaste;
- Realizar ensaios de corrosão dos revestimentos, para avaliar a resistência à corrosão das diversas ligas utilizadas neste trabalho;
- Avaliar os custos atribuídos à corrosão para a soldagem de revestimento;
- Avaliar a transferência por curto-circuito através dos critérios de estabilidade do arco.

CAPÍTULO X

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

10. Referências bibliográficas

AGARWAL, D. C. & BRILL, U. High-temperature-strength Nickel Alloy. Advanced Materials & Process. 158: pp. 31-34 p. 2000a.

AGARWAL, D. C. & KLOEWER, J. Nickel Base Alloys: Corrosion Challenges In The New Millennium. Corrosion 2000: NACE International 2000b.

AMIN, M. Prediction of Pulse Parameters for MIG Welding. Welding Institute Research Bulletin. 24: 48 - 54 p. 1983a.

AMIN, M. Pulse Current Parameters for Arc Stability and Controlled Metal Transfer in Arc Welding. Metal Construction: 272 - 278 p. 1983b.

ANTONY, J.; HUGHES, M.; KAYE, M. Reducing Manufacturing Process Variability using Experimental Design Technique: A Case Study. Integrated Manufacturing Systems: MCB UP Ltd. 10: 162 - 170 p. 1999.

ASM. Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys. 11.ed. Ohio: ASM International, v.1. 1993a

ASM. Welding Brazing and Soldering. 11.ed. Ohio: ASM International, v.6. 1993b

ASM. Corrosion. 11.ed. Ohio: ASM International, v.13. 1993c

ASM. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Specials-purposed Materials. Ohio: ASM International, v.2. 1997

AWS. Welding Handbook - Materials and Applications - Part 1. 8.ed. Miami: American Welding Society, v.3. 1996

AWS. Welding Handbook - Welding Processes. 9.ed. Miami: American Welding Society, v.2. 2004

BRANDI, S. D.; WEINER, E.; MELO, V. O. Soldagem - Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgard Blücher. 2004. 504 p.

CHAN, B.; PACEY, J.; BIBBY, M. Modelling Gas Metal Arc Welding Geometry using Artificial Neural Network Technology. Canadian Institute of Mining and Metallurgy, v.38, n.1, p.43 - 51, 1999.

DUPONT, J. N.; BANOVIC, S. W.; MARDER, A. R. Microstructural Evolution and Weldability of Dissimilar Welds between a Super Austenitic Stainless Steel and Nickel-Based Alloys. Welding Journal, v.82, n.6, p.125-135, June, 2003.

EISELSTEIN, H. L. & TILLACK, D. J. The Invention and Definition of Alloy 625. Superalloy 718, 625, and Various Derivates. E. A. Loria: TMS Warrendale PA: 1 - 14 p. 1991.

GOHR, R. Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG. 2002. Tese. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2002. 165 p.

GOMES, E. B. Análise do Comportamento da Soldagem por Curto-Circuito aplicado ao Processo Eletrodo Tubular através da Metodologia Taguchi. 2006. Dissertação. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, Maio, 2006.

ISO 10423. Petroleum and natural Gas Industries - Drilling and Production Equipment - Wellhead and Cristmans Tree Equipment. Switzerland: ISO 2003.

KEJELIN, N. Z.; BUSCHINELLI, A. J. A.; POPE, A. M. Influence of Welding Parameters on the Formation of Partially Diluted Zones of Dissimilar Metal Welds. Soldagem & Inspeção, v.12, n.3, p.195 - 203, Jul./Set., 2007.

LUER, K.; DUPONT, J.; MARDER, A.; SKELONIS, C. Corrosion Fatigue of Alloy 625 weld claddings in Combustion Environments. Materials at High Temperature, v.18, n.1, p.11-19, February, 2001.

MACHADO, I. G. Soldagem e Técnicas Conexas: processos. Porto Alegre. 1996. 477 p.

MAGALHÃES, S. G. Avaliação do revestimento a base de liga de níquel em aço estrutural empregando o metal de adição ERNiCrMo-3 através da soldagem MIG/MAG. 2008. Dissertação. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

MARQUES, P. V. Tecnologia da soldagem. 1.ed. Belo Horizonte: ESAB, v.1. 1991. 352 p.

MARQUES, P. V.; MONDENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem - Fundamentos e Tecnologia. 1.ed. Belo Horizonte: UFMG. 2005. 363 p.

MATHEW, M. D.; BHANU SANKARA RAO, K.; MANNAN, S. L. Creep properties of service-exposed Alloy 625 after re-resolution annealing treatment. Materials Science and Engineering A, v.372, n.1-2, p.327-333, 2004.

MCCONNELL, I. A. & MCPHERSON, N. A. The application of statistical process design to a FCAW process. Welding Journal, v.76, p.412-416, October, 1997.

MIRANDA, E. C. Estudo Exploratório de Parâmetros de Soldagem de Revestimentos com Ligas de Níquel Empregando o Processo TIG com Alimentação de Arame Frio. 2008. Dissertação. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

MIRANDA, H. C. Influencia da Indutância na Soldagem MIG/MAG na Posição Sobre-Cabeça. 1999. Dissertação. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Fevereiro, 1999.

MIRANDA, H. C. Reconhecimento e Controle da Transferência Metálica no Processo MIG/MAG Pulsado. 2002. Tese. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Abril, 2002.

MODENESI, P. J. Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais. 2008. Apostila. Curso de Pós-graduação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2008.

MOTTA, M. F. Aplicação do Processo MIG/MAG Pulsado com Duplo Arame e Potenciais Isolados em Soldagens de Revestimento. 2002. Tese. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2002.

NIXON, J. H. & NORRISH, J. Determination of Pulsed MIG Process Parameters. Welding & Metal Fabrication, p.4-7, April, 1988.

NORRISH, J. Gas metal arc welding. In: Advanced Welding Process. IOP Publishing, p.131 - 173, 1992.

OGBORN, J. S.; OLSON, D. L.; CIESLAK, M. J. Influence of solidification on the microstructural evolution of nickel base weld metal. Materials Science and Engineering A, v.203, n.1-2, p.134-139, 1995.

PAIVA, F. D. Q.; PESSOA, E. F.; MIRANDA, H. C.; MOTTA, M. F.; FARIAS, J. P. Análise das características geométricas de cordões de solda depositados em chapas finas de alumínio com o processo MIG/MAG em corrente alternada. XXX CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM. Rio de Janeiro - RJ: Anais do CONSOLDA - 2004.

PAN, L. K.; WANG, C. C.; HSIAO, Y. C.; HO, K. C. Optimization of Nd:YAG laser welding onto magnesium alloy via Taguchi analysis. Optics & Laser Technology, v.37, n.1, p.33-42, 2005.

PESSOA, E. F.; PAIVA, F. D. Q.; FARIAS, J. P.; MIRANDA, H. C.; MOTTA, M. F. Efeito da corrente alternada na soldagem de alumínio ABNT 6060 empregando o processo MIG/MAG. III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, 2004. Belém, PA: Associação Brasileira de Engenharia e Ciência de Materiais - ABCM 2004.

PETROBRAS N -1707. Projeto de vaso de pressão com revestimento. Rio de Janeiro - RJ: PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. 1999.

QUITES, A. M. Introdução à soldagem a Arco Voltaico. Florianópolis - SC: Soldasoft. 2002

RAMIREZ, A. J. & LIPPOLD, J. C. High temperature behavior of Ni-base weld metal: Part II - Insight into the mechanism for ductility dip cracking. Materials Science and Engineering A, v.380, n.1-2, p.245-258, 2004.

ROSS, P. J. Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade. São Paulo - SP: McGraw-Hill Ltda. 1991. 333 p.

SCOTTI, A. & PONOMAREV, V. Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. 1.ed. São Paulo: Artlibre. 2008. 284 p.

SHOEMAKER, L. E. & CRUM, J. R. Nickel-Chromium-Molybdenum Superalloys: The Solution to Corrosion Problems in Wet Limestone FGD Air Pollution Control Systems. Special Metal Corporation, 3200 Riverside Drive, Huntington, WV USA. 2003

SIMS, C. T. & HAGEL, W. C. The Superalloys II. New York: John Wiley & Sons. 1987. 609 p.

Special Metals. INCONEL alloy C-276, Publication N° SMC-019. Huntington, WV, USA: Special Metals Corporation 1999.

Special Metals. Product Handbook of High-Performance Alloys. Huntington, WV, USA: Special Metals Corporation 2008.

TANCRET, F.; BHADESHIA, H. K. D. H.; MACKAY, D. J. C. Design Of A Creep Resistant Nickel Base Superalloy For Power Plant Applications Part 1 - Mechanical Properties Modeling. Materials Science and Technology, v.19, n.3, p.283 - 290, 2003.

THOMAS, C. & TAIT, P. The Performance of Alloy 625 in long-term Intermediate Temperature applications. Int. J. Pressure Vessel & Piping, v.59, p. 41 - 49, 1994.

VAIDYA, V. V. Shielding Gas Mixtures for Semiautomatic Welds. Welding Journal, v.81, n.9, p.43-8, September, 2002.

VIEIRA, S. R. B. Um sistema de gerenciamento da qualidade para fábricas montadoras com ênfase no método Taguchi e QFD. 1996. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, Fevereiro, 1996.

APÊNDICE I

Determinação do intervalo admissível para os critérios de qualidade.

Após os ensaios de confirmação previstos pelo método Taguchi deve-se calcular um intervalo admissível para cada critério de qualidade (diluição, razão R/L e DxR/L), com o objetivo de determinar se o Taguchi pode ser utilizado com segurança. Caso o valor obtido nos ensaios de confirmação esteja dentro do intervalo admissível, admite-se que o Taguchi seja apto para prever os valores dos critérios de qualidade estabelecidos, caso isso não ocorra significa dizer que, há fortes interações entre os fatores de controle impossibilitando o uso do método Taguchi para previsão dos valores ótimos dos critérios de qualidade (MIRANDA, 1999). Assim O intervalo de confiança para o η previsto foi calculado através dos seguintes passos:

- 1º Passo: Determinação da variância do erro (σ_e^2) dado pela Equação 20.

$$\sigma_e^2 = \frac{SQE}{gl_e} \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

SQE = soma dos quadrados devido ao erro;

gl_e = graus de liberdade associados ao erro.

- 2º Passo: Determinação da variância do erro de previsão (σ_{prev}^2) pela Equação 21.

A variância do erro de previsão é diferença entre η do experimento e o η_{ot} previsto, a qual é composta por duas parcelas. A primeira parcela denominada “erro de repetição dos experimentos” é o erro associado ao número de repetições para cada condição (cada linha da matriz ortogonal); enquanto que a segunda parcela denominada de “erro na previsão de η_{ot} ” é o que está associado ao número de experimentos empregados (tamanho da amostra) para determinação de η_{ot} e da variância do erro.

$$\sigma_{prev}^2 = \left(\frac{1}{n_r}\right) \cdot \sigma_e^2 + \left(\frac{1}{n_o}\right) \cdot \sigma_e^2 \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

η_{ot} = valor obtido para η , quando se utiliza os níveis do fatores de controle previstos para minimizar o critério de qualidade.

n_r = número de repetições para cada condição;

$1/n_o$ = tamanho equivalente da amostra para estimação de η_{ot} obtido pela Equação 22

$$\frac{1}{n_o} = \frac{1}{n} + \left(\frac{1}{n_{A1}} - \frac{1}{n} \right) + \left(\frac{1}{n_{B3}} - \frac{1}{n} \right) + \dots \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

n é número total de experimentos da matriz ortogonal (número de linhas);

n_{A1} é número de repetição do nível ótimo A1 dentro de sua coluna na matriz ortogonal;

n_{B3} é número de repetição do nível ótimo B3 dentro de sua coluna na matriz ortogonal;

- 3º Passo: Determinação do desvio padrão associado à previsão de η_{ot} (σ_{prev}) obtido pela Equação 23.

$$\sigma_{prev} = \sqrt{\sigma_{prev}^2} \quad \text{Equação 23}$$

- 4º Passo: Determinação do intervalo de confiança associado a previsão de η_{ot} é calculado pela Equação 24.

$$IC = \pm 2 \cdot \sigma_{prev} \quad \text{Equação 24}$$

- 5º Passo: Determinação do intervalo de confiança com base no η_{ot} fornecido pela Equação 25.

$$\eta_{min} \leq \eta_{\pm} \leq \eta_{max} \quad \text{Equação 25}$$

Onde:

$$\eta_{min} = \eta_{ot} - IC$$

$$\eta_{max} = \eta_{ot} + IC$$

- 6º Passo: Determinação do intervalo admissível para o critério de qualidade calculado através da Equação 26 e da Equação 27

Para calcular os valores máximos e mínimos do intervalo admissível para os critérios de qualidade; utiliza-se a Equação 26 apresentada abaixo, a qual foi desenvolvida a partir da Equação 11.

$$y_i = \sqrt{n_i \cdot (10^{-\eta/10})} \quad \text{Equação 26}$$

Assim tem-se que o intervalo admissível para um critério de qualidade qualquer é dado pela Equação 27.

$$y_{min} \leq y \leq y_{max} \quad \text{Equação 27}$$

Onde:

y = É o critério de qualidade que se deseja calcular, podendo ser substituído por D, R/L e DxR/L que correspondem a diluição, razão R/L e o produto DxR/L respectivamente

y_{min} = é o valor para o critério de qualidade calculado utilizando o valor do η_{min} no lugar de η Equação 26.

y_{max} = é o valor para o critério de qualidade calculado utilizando o valor do η_{max} no lugar de η Equação 26.

Para exemplificar o uso da seqüência dos passos descritos anteriormente, calcula-se o intervalo admissível para a diluição (matriz L9-1) como critério de qualidade:

g) Determinação da variância do erro (σ_e^2):

Primeiramente calcula-se σ_e^2 (Equação 20), com os valores de SQE e gl_e obtidos através de um software de estatística usado no tratamento dos dados.

$$\sigma_e^2 = \frac{SQE}{gl_e} = \frac{24,067}{9} = 2,674$$

h) Determinação da variância do erro de previsão (σ_{prev}^2):

Para obtermos o valor de σ_{prev}^2 tem-se que calcular primeiramente o valor de suas duas parcelas conforme mostrado abaixo.

- Erro de repetição dos experimentos (1ª parcela da Equação 21):

Foram retiradas duas amostras para análise de cada corpo de prova contabilizando assim duas repetições, ou seja, temos $n_r=2$

$$\left(\frac{1}{n_r}\right) \cdot \sigma_e^2 = \left(\frac{1}{2}\right) \times 2,674 = 1,337$$

- Erro na previsão de η_{ot} (2ª parcela da Equação 21):

Para calcular essa parcela, em primeiro lugar, é preciso encontrar o valor de $1/n_0$ o que será feito a seguir utilizando a Equação 22.

$$\frac{1}{n_o} = \frac{1}{n} + \left(\frac{1}{n_{A1}} - \frac{1}{n}\right) + \left(\frac{1}{n_{B3}} - \frac{1}{n}\right) + \left(\frac{1}{n_{C2}} - \frac{1}{n}\right) \Rightarrow \frac{1}{9} + \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{9}\right) + \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{9}\right) + \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{9}\right)$$

$$\therefore \boxed{\frac{1}{n_o} = 0,778}$$

Onde temos:

$n=9$, pois trata-se de uma matriz L9, ou seja, uma matriz com 9 experimentos

$n_{A1}=3$, corresponde ao nível 1 do fator de controle tensão de referência(Ur) que aparece três vezes na primeira matriz L9 (Tabela 22)

$n_{B3}=3$, corresponde ao nível 2 do fator de controle técnica da tocha(T.T) que aparece três vezes na primeira matriz L9 (Tabela 22)

$n_{C2}=3$, corresponde ao nível 1 do fator de controle velocidade de soldagem(Vs) que aparece três vezes na primeira matriz L9 (Tabela 22)

Assim, com os valores das duas parcelas, já se pode calcular o valor de (σ_{prev}^2) a partir da Equação 21, como mostrado abaixo:

$$\sigma_{prev}^2 = \left(\frac{1}{n_r}\right) \cdot \sigma_e^2 + \left(\frac{1}{n_o}\right) \cdot \sigma_e^2 \Rightarrow 1,337 + 0,778 \times 2,674$$

$$\boxed{\sigma_{prev}^2 = 3,417}$$

i) Determinação do desvio padrão associado à previsão de η_{ot} (σ_{prev}):

De posse do valor de σ_{prev}^2 , agora se pode calcular o valor de σ_{prev} através da Equação 23 como mostra a seguir.

$$\sigma_{prev} = \sqrt{3,417} \Rightarrow \boxed{\sigma_{prev} = 1,848}$$

j) Determinação do intervalo de confiança (IC):

Com base na Equação 24 e no valor obtido para σ_{prev} , calcula-se o valor do IC como pode ser visto abaixo:

$$IC = \pm 2 \cdot \sigma_{prev} \Rightarrow IC = \pm 2 \times 1,848 \quad \therefore \boxed{IC = \pm 3,697}$$

k) Determinação do intervalo de confiança com base no η_{ot} :

A partir do IC determinado no passo anterior e utilizando a Equação 25, chega-se ao valor do intervalo de confiança com base no η_{ot} conforme mostrado a seguir:

$$\eta_{min} \leq \eta \leq \eta_{max} \Rightarrow -8,74 \leq \eta \leq -16,14$$

Onde temos:

$$\eta_{ot} = -12,44$$

l) Determinação do intervalo admissível:

Por fim de posse dos valores de η_{min} e η_{max} obtidos no passo anterior, pode-se calcular o intervalo admissível para a diluição utilizando a Equação 26 e a Equação 27.

- Cálculo de D_{min} :

$$y_i = \sqrt{n_i \cdot (10^{-\eta/10})} \Rightarrow D_{min} = \sqrt{1 \cdot (10^{-(-8,74/10)})} \quad \boxed{D_{min} = 2,74}$$

- Cálculo de D_{max} :

$$y_i = \sqrt{n_i \cdot (10^{-\eta/10})} \Rightarrow D_{max} = \sqrt{1 \cdot (10^{-(-16,14/10)})} \quad \boxed{D_{max} = 6,41}$$

Onde:

D_{min} = é a diluição calculada pela Equação 26 utilizando o valor de η_{min}

D_{max} = é a diluição calculada pela Equação 26 utilizando o valor de η_{max}

Assim usando a Equação 27, temos o intervalo admissível para a diluição da matriz L9-1.

$$y_{min} \leq y \leq y_{max} \Rightarrow D_{min} \leq D \leq D_{max} \Rightarrow \underline{2,74 \leq D \leq 6,41}$$