

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE REVESTIMENTO À
BASE DE INCONEL 625 UTILIZANDO OS PROCESSOS DE SOLDAGEM
MIG E PLASMA PÓ**

Aureliano Xavier dos Santos

Campina Grande
Fevereiro/2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE REVESTIMENTO À
BASE DE NÍQUEL UTILIZANDO OS PROCESSOS DE SOLDAGEM MIG E
PLASMA PÓ**

Aureliano Xavier dos Santos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como requisito parcial à obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Orientador: Dr. Theophilo Moura Maciel

Campina Grande
Fevereiro/2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- S237a Santos, Aureliano Xavier dos.
Avaliação da resistência à corrosão de revestimento à base de inonel 625 utilizando os processos de soldagem MIG e plasma pó / Aureliano Xavier dos Santos. – Campina Grande, 2014.
152 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2014.
- "Orientação: Prof. Dr. Theophilo Moura Maciel".
Referências.
1. Revestimento. 2. Resistência à Corrosão. 3. Processo PTA-P.
4. Processo MIG I. Maciel, Theophilo Moura. II. Título.
- CDU 679.7.024.7(043)

“AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE REVESTIMENTO À BASE DE INCONEL 625 UTILIZANDO OS PROCESSOS DE SOLDAGEM MIG E PLASMA PÓ”.

AURELIANO XAVIER DOS SANTOS

Dissertação Aprovada em 28/02/2014 pela banca examinadora constituída dos seguintes membros:



Dr. Theophilo Moura Maciel

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Marco Antonio dos Santos

Examinador Interno

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Renato Alexandre Costa de Santana

Examinador Externo

UAE/CES/UFCG

*Ao meu filho Matheus Vinicius Vasconcelos Xavier
Á minha esposa Juliana M. V. Xavier pela presença ativa e compreensão nos
momentos de ausência ao longo de toda essa jornada.*

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE REVESTIMENTO À
BASE DE NÍQUEL UTILIZANDO OS PROCESSOS DE SOLDAGEM MIG E
PLASMA PÓ**

Aureliano Xavier dos Santos

Dissertação aprovada em 28 de Fevereiro de 2014, pela banca examinadora constituída dos seguintes membros:

Prof. D. Sc. Theophilo Moura Maciel
Orientador

Prof. D.Sc. Marco Antonio dos Santos
Examinador Interno – UAEM/UFCG

Prof. Renato Alexandre Costa de Santana
Examinador Externo – UEA/UFCG

AGRADECIMENTOS

A DEUS por fazer oportuna mais uma etapa no decorrer da minha vida, e por está sempre presente.

Agradeço especialmente a minha família: a minha esposa Juliana Meira de Vasconcelos Xavier pelo incentivo e pela paciência e o carinho do meu filho Matheusinho e aos meus pais, Antonio Anízio e Severina Xavier, por darem a vida e a coragem de lutar por ela, ao meu irmão, Adriano Xavier, pelo apoio.

Agradeço ao meu orientador Professor Dsc Theophilo Moura Maciel, o qual me apoiou e orientou durante todo tempo.

Agradeço ao Professor Dsc Renato Alexandre Costa de Santana, pela disponibilidade, contribuição, receptividade no laboratório de corrosão na UFCG/Cuité, pelo exemplo de profissional dedicado.

O meu muito obrigado, ao grande amigo irmão que conquistei durante o mestrado, Rômulo Rodrigues, que esteve comigo durante as noitadas e madrugadas de laboratório, de estudos e experimentos acompanhado de um bom café ou Chafé, que por muitas vezes deixou de está em seu lar descansando para me ajudar, essa vitória é sua também.

Ao grande amigo Anderson Laursen, que assim como Eu, teve suas dificuldades devido ao vínculo empregatício, pelo companheirismo, amizade e lealdade, como também pelos bons cafés tomados em sua casa, e nas tardes de sexta na padaria.

Ao meu amigo de longas datas Mauri Ávila, que sempre torceu por mim.

À Universidade Federal de Campina Grande e ao Programa de Pós Graduação de Engenharia Mecânica, pela contribuição na minha formação acadêmica e pessoal.

Ao Laboratório de Soldagem (LABSOL) e aos demais Laboratórios de Caracterização de Materiais, pela estrutura oferecida para realização da pesquisa.

A Metaltécnica Industrial Ltda, em nome do Sr Eufrásio Barbosa e Sr Liheldson Barbosa, pela paciência e disponibilidade dos horários, como também por permitir o uso de algumas ferramentas para execução dos experimentos.

“Por mais que se faça, sempre fica algo por fazer; por mais exato que se queira ser, erra-se inconscientemente. A imperfeição é apanágio do ser humano”.

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE REVESTIMENTO À BASE DE INCONEL 625 UTILIZANDO OS PROCESSOS DE SOLDAGEM MIG E PLASMA PÓ

RESUMO

As falhas por corrosão são as principais causadoras de vazamento na indústria do petróleo. Por esta razão tem sido muito estudada a utilização de novos materiais com melhores resistências a este fenômeno. Uma das alternativas mais utilizadas, devido ao menor custo envolvido, é a aplicação de revestimentos com estes materiais através de processos de soldagem. Este trabalho teve como objetivo inicialmente encontrar os melhores parâmetros de soldagem para se obter o perfil geométrico dos cordões de solda mais adequado para este fim, principalmente a diluição, utilizando planejamento experimental estatístico fatorial em dois níveis e determinar em seguida a resistência à corrosão dos cordões depositados utilizando dois processos de soldagem. Foram utilizados o processo Plasma Pó (PTA-P) e o processo MIG (Metal Inert Gás) ambos automatizados, e como metal de adição, a liga AWS ER NiCrMo-3, à base de Ni, conhecida comercialmente como Inconel 625, na forma de pó com granulometria de 63 µm no processo PTA-P e na forma de arame com diâmetro de 1,2 mm no processo MIG. Como metal de base utilizou-se chapas do aço API 5L X70 utilizado na fabricação de dutos para transporte de petróleo. A resistência à corrosão dos revestimentos foi avaliada por polarização potenciodinâmica linear e espectroscopia de impedância eletroquímica. Foram avaliados também o percentual de Fe e os valores de microdureza na superfície dos revestimentos. Os resultados mostraram que o reforço, a penetração e a diluição dos revestimentos depositados pelo processo PTA-P assim como os seus valores de microdureza foram menores do que aqueles obtidos pelo processo GMAW. Os revestimentos obtidos pelo processo PTA-P também apresentaram melhores resultados de resistência à corrosão.

Palavras-chave: Revestimento, Resistência à Corrosão, Processo PTA-P, Processo MIG, Inconel 625.

EVALUATION OF THE CORROSION RESISTANCE OF INCONEL 625 COATING USING MIG AND PTA-P WELDING PROCESS

ABSTRACT

The corrosion failures are the main cause of leakage in oil industry. Because of this new materials with higher corrosion resistance have been researched. One of the alternatives more used, for its low cost, is the application of coating by welding process. This work aimed first to find the better welding parameters to obtain the more adequate weld bead geometry, mainly the dilution, using a factorial statistical experimental design on two levels, and following to determinate its corrosion resistance using two welding process. Automatized Plasma Transferred Arc- Powder (PTA-P) and Metal Inert Gas (MIG) were used. The AWS ER NiCrMo-3Ni alloy, knowing as Inconel 625, in powder form with grain size 63 μm and in wire with 1,2 mm diameter were used as filler metals. API 5L X70 steel plate, used in pipeline for oil and gas transportation was used as base metal. The corrosion resistance was evaluated using linear potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy analysis. The Fe percents and microhardness test in weld bead surface were also done. The results showed that the weld bead hardness and its penetration and dilution obtained by PTA-P process were lower than those obtained by GMAW process. The coating obtained by PTA-P process also presented better corrosion resistance.

Keywords : Corrosion resistance, Coating , PTA-P process , MIG process, Inconel 625.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 Justificativa	24
2 OBJETIVOS	25
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
3.1 Aços ARBL.....	26
3.1.1 Aço API 5L X70.....	29
3.2 Níquel e suas ligas.....	31
3.2.1 Níquel	31
3.2.2 Superligas.....	32
3.2.2.1 Super Liga de Níquel.....	32
3.3 Soldagem.....	34
3.3.1 Soldagem de Revestimento.....	35
3.3.2.1 Variáveis de Soldagem do Processo MIG/MAG	37
3.3.2.1.1 Corrente	37
3.3.2.1.2 Tensão de Soldagem	39
3.3.2.1.3 Velocidade de Alimentação	39
3.1.2.1.4 Velocidade de Soldagem	40
3.1.2.1.5 Ângulo de Ataque.....	40
3.1.2.1.6 Comprimento do Arame-eletrodo (Stick-out) e DBCP	41
3.3.2.1.7 Diâmetro do Arame	42
3.3.2.1.8 Gás de Proteção	42
3.3.2 Soldagem PTA-P	43
3.3.2.1 Variáveis de Soldagem do Processo PTA-P	46
3.3.2.1.1 Corrente	46
3.3.2.1.2 Taxa de Alimentação do pó.....	46

3.3.2.1.3	Velocidade de Soldagem	47
3.3.2.1.4	DBP, Recuo do eletrodo e Diâmetro do orifício do bico	48
3.3.2.1.5	Granulometria do Pó.....	49
3.3.2.1.6	Sistema de Gases	49
3.3.2.1.6	Características principais do processo	50
3.4	Diluição	51
3.4	Energia de Soldagem.....	52
3.4.1	Rendimento Térmico.....	52
3.5	Corrosão	54
3.5.1	Formas de corrosão.....	55
3.5.1.1	Corrosão por pites	56
3.5.2	Técnicas para avaliar a resistência à corrosão	57
3.5.2.1	Técnicas eletroquímicas	57
3.5.2.1.1	Resistência à Polarização Linear	58
3.5.2.1.2	Técnica de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica ...	60
3.6	Planejamento Experimental	60
4	MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA	62
4.1	Materiais	62
4.1.1	Metal de Base.....	62
4.1.2	Metal de Adição	63
4.1.3	Gases	64
4.2	Equipamentos	64
4.2.1	Equipamento de Corte	64
4.2.2	Equipamento de Soldagem.....	64
4.2.3	Equipamentos para Metalografia	65
4.2.4	Microdurômetro.....	66
4.2.5	Microscópio Ótico	66

4.2.6 Equipamento para Ensaio de Corrosão	67
4.3 Metodologia.....	67
4.3.1 Preparação dos corpos de prova para soldagem	67
4.3.2 Deposição dos Revestimentos	68
4.3.3 Caracterização.....	74
4.3.3.1 Preparação das amostras.....	74
4.3.3.2 Caracterização geométrica e cálculo da diluição.....	75
4.3.3.3 Preparação Metalográfica.....	76
4.3.3.4 Ensaio de Microdureza	76
4.3.3.5 Análise de Composição Química (Teor de Ferro)	77
4.3.3.6 Análise de corrosão	77
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	79
5.1 Revestimentos depositados por soldagem PTA-P	79
5.1.1 Avaliação dos parâmetros geométricos e diluição.....	79
5.1.1.3 Efeitos das variáveis do processo sobre o índice de convexidade (IC)	86
5.1.1.4 Efeitos das variáveis do processo sobre a penetração (P).....	89
5.1.1.5 Efeitos das variáveis do processo sobre a diluição (D%)	92
5.1.2 Análise Metalográfica dos revestimentos por PTA-P	95
5.1.2.1 Microdureza.....	95
5.1.2.2 Microestrutura.....	97
5.1.3 Avaliação da Corrosão dos Revestimentos depositados por PTA-P	99
5.1.3.1 Efeitos das variáveis sobre a resistência à polarização (R_p)	101
5.1.3.2 Efeitos das variáveis sobre o potencial de corrosão (E_{corr}).....	103
5.1.4 Resistência à corrosão	106
5.2 Revestimentos depositados por soldagem MIG.....	108
5.2.1 Avaliação dos parâmetros geométricos e diluição.....	108

5.2.1.1 Efeitos das variáveis do processo sobre o reforço (r).....	110
5.2.1.2 Efeitos das variáveis do processo sobre a largura (L).....	113
5.2.1.3 Efeitos das variáveis do processo sobre o índice de convexidade (IC)	116
5.2.1.4 Efeitos das variáveis do processo sobre a penetração (P).....	119
5.2.1.5 Efeitos das variáveis do processo sobre a diluição (D%)	122
5.2.2 Análise Metalográfica dos revestimentos por MIG.....	125
5.2.2.1 Microdureza.....	125
5.2.2.2 Microestrutura.....	127
5.2.3 Avaliação da Corrosão dos Revestimentos depositados por MIG ..	129
5.2.3.1 Efeitos das variáveis sobre a resistência à polarização (R_p)	131
5.2.3.2 Efeitos das variáveis sobre o potencial de polarização (E_{corr}) .	133
5.2.4 Resistência à corrosão	136
5.3 Estudo comparativo dos revestimentos por PTA-P e MIG com relação à resistência a corrosão	138
6 CONCLUSÕES	141
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	142
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143
ANEXO.....	152

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Previsão de Investimentos pela Petrobras no período 2012-2016...	22
Figura 2 - Evolução dos ARBL e processos de fabricação dos tubos API 5L. .	27
Figura 3 - Desenvolvimento dos ARBL com os principais elementos de liga...	28
Figura 4 - Evolução do tamanho de grão obtido pelos diferentes processos de laminação.....	28
Figura 5 - Microestrutura presentes no desenvolvimento de aços API.	30
Figura 6 - Classificação das Superligas.	32
Figura 7 - Esquema do Equipamento do processo MIG/MAG.....	37
Figura 8 - Efeito da polaridade do eletrodo sobre o cordão de solda, mantidos constantes os demais parâmetros.....	38
Figura 9 - Modos de transferência metálica na soldagem MIG/MAG.	38
Figura 10 - Influência do ângulo de deslocamento na soldagem MIG/MAG	41
Figura 11 - Representação da distância do bico de contato peça – DBCP e da projeção do arame (Stickout).	42
Figura 12 - Esquema comparativo entre os Processos PTA e PAW.....	44
Figura 13 - Esquema do funcionamento da Tocha PTA-P.....	45
Figura 14 - Diluição versus Corrente de soldagem sob diferentes taxas de alimentação de pó e vazão de gás de arraste plasma	47
Figura 15 - Distancia Bico–Peça (DBP) e Recuo do Eletrodo (Rc).	48
Figura 16 - Esquema do método de produção de pós.	49
Figura 17 - Perfil geométrico dos cordões de solda.	51
Figura 18 - Rendimento térmico do arco para os processos de soldagem PAW, GTAW, GMAW e SAW.....	53
Figura 19 - Tipos comuns de pites.	57
Figura 20 - Chapa de aço ARBL API 5L X70.	62
Figura 21 - Equipamento de Soldagem.....	65
Figura 22 - Lixadeira Manual e Politriz	65

Figura 23 - Microdurômetro digital FM-700 Future Tech.	66
Figura 24 - Microscópio ótico OLYMPUS BX 51M.	66
Figura 25 - Potenciostato/Galvanostato PG STATE30 da Autolab.....	67
Figura 26 - Revestimento MIG com três passes com sobre posição 1/2.	69
Figura 27 - Rendimento térmico do arco para os processos de soldagem.	72
Figura 28 - Revestimento Plasma Pó com três passes com sobre posição 1/2.	73
Figura 29 - Retirada das amostras nas chapas para a realização dos ensaios.	75
Figura 30 - Medição das características geométricas e da área do cordão de solda.....	75
Figura 31 - Ensaio de microdureza ao longo de linhas verticais.	77
Figura 32 - Célula eletroquímica e Gaiola de Faraday para análise de corrosão.	78
Figura 33 - Diagrama de Pareto dos efeitos para variável reforço r (mm).....	81
Figura 34 - Superfície de resposta do reforço sob a influência da Corrente de soldagem versus velocidade de soldagem, fixando-se a Taxa de Alimentação 28,8 g/min (-1).....	82
Figura 35 - Diagrama de Pareto dos efeitos para variável largura L (mm).....	84
Figura 36 - Superfície de resposta da Largura L (mm) sob a influência da Corrente de soldagem versus Velocidade de soldagem, fixando-se a Taxa de Alimentação 32 g/min (+1).	85
Figura 37 - Diagrama de Pareto dos efeitos para variável do índice de convexidade (IC)	87
Figura 38 - Superfície de resposta do índice de convexidade sob a influência da Velocidade de Soldagem versus Taxa de alimentação, fixando-se a corrente de soldagem 184 (-1).	88
Figura 39 - Diagrama de Pareto dos efeitos para variável penetração P(mm). 90	
Figura 40 - Superfície de resposta da penetração sob a influência da corrente de soldagem versus Velocidade de soldagem, fixando-se a taxa de alimentação 32 g/min (+1).....	91
Figura 41 - Diagrama de Pareto dos efeitos para variável diluição D (%).	93

Figura 42 - Superfície dos fatores Corrente e a velocidade de soldagem na diluição(%), fixando-se a Taxa de Alimentação 32 g/min (+1).	94
Figura 43 - Microdureza ao longo das linhas verticais para H = 8,34 kJ/cm Experimento 3 – PTA-P.....	96
Figura 44 - Microdureza ao longo das linhas verticais para H = 18,99 KJ/cm Experimento 2 – PTA-P.....	97
Figura 45 - Variação de microestrutura ao longo da interface MS/Substrato Experimento 2 (H=18,99 KJ/cm) – PTA-P.....	98
Figura 46 - Variação de microestrutura ao longo da interface MS/Substrato Experimento 3 (H=8,34 KJ/cm) – PTA-P.....	99
Figura 47 - Diagrama de Pareto dos efeitos para resistência a polarização. .	101
Figura 48 - Superfície de resposta da resistência à polarização sob a influência da Corrente versus velocidade de soldagem, fixando-se a Taxa de Alimentação 28,8 g/min (-1).	102
Figura 49 - Diagrama de Pareto dos efeitos para Potencial de corrosão.....	104
Figura 50 - Superfície de resposta da resistência à polarização sob a influência da Corrente versus velocidade de soldagem , fixando-se a Taxa de Alimentação 28,8 g/min (-1).	105
Figura 51 - Curva de polarização dos experimentos 2 e 7 por PTA-P.	106
Figura 52 - Diagrama de impedância dos experimentos 2 e 7 por PTA-P.	107
Figura 53 - Diagrama de Pareto dos efeitos para variável reforço r (mm).....	111
Figura 54 - Superfície de resposta do reforço sob a influência da Tensão versus Velocidade de alimentação, fixando-se a Velocidade de Soldagem 20 cm/min (-1).	112
Figura 55 - Diagrama de Pareto dos efeitos para variável largura L (mm).....	114
Figura 56 - Superfície de resposta da Largura sob a influência da Tensão versus Velocidade de soldagem, fixando-se a Velocidade de alimentação 9 m/min (+1).	115
Figura 57 - Diagrama de Pareto dos efeitos para variável do índice de convexidade (IC)	117
Figura 58 - Superfície de resposta do índice de convexidade sob a influência da Tensão versus Velocidade de soldagem, fixando-se a Velocidade de alimentação 9 m/min (+1).....	118

Figura 59 - Diagrama de Pareto dos efeitos para variável penetração P(mm).	120
Figura 60 - Superfície de resposta da penetração sob a influência da Tensão versus Velocidade de alimentação, fixando-se a Velocidade de soldagem 20 cm/min (-1).	121
Figura 61 - Diagrama de Pareto dos efeitos para variável diluição D %.	123
Figura 62 - Superfície de resposta da penetração sob a influência da Tensão versus Velocidade de soldagem, fixando-se a Velocidade de alimentação 9 m/min (+1).	124
Figura 63 - Microdureza ao longo das linhas verticais para H = 8,34 kJ/cm. Experimento 5 - MIG.	126
Figura 64 - Microdureza ao longo das linhas verticais para H = 18,99 KJ/cm. Experimento 4 -MIG.	126
Figura 65 - Variação de microestrutura ao longo da interface MS/Substrato Experimento 4 - MIG (H=18,99 KJ/cm).	128
Figura 66 - Variação de microestrutura ao longo da interface MS/Substrato Experimento 5 - MIG (H=8,34 KJ/cm).	129
Figura 67 - Diagrama de Pareto dos efeitos para resistência a polarização. .	131
Figura 68 - Superfície de resposta da resistência à polarização sob a influência da Tensão versus Velocidade de soldagem, fixando-se a Velocidade de Alimentação 9 m/min (+1).	132
Figura 69 - Diagrama de Pareto dos efeitos para potencial de corrosão	134
Figura 70 - Superfície de resposta do Potencial de Corrosão, E_{corr} , sob a influência da velocidade de soldagem versus tensão, fixando-se a velocidade de alimentação 9 m/min (+1).	135
Figura 71 - Curva de polarização dos experimentos 4 e 5 por MIG.	136
Figura 72 - Diagrama de impedância dos experimentos 4 e 5 por MIG.	137
Figura 73 - Curva de polarização dos experimentos 4 por MIG e 2 por PTA-P.	139
Figura 74 - Curva de polarização dos experimentos 4 por MIG e 2 por PTA-P	140

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do níquel.	31
Tabela 2 - Composição química (% em peso) do metal de base utilizado.	63
Tabela 3 - Composição química (% em peso) do metal de adição na forma de Pó.	63
Tabela 4 - Composição química (% em peso) do metal de adição na forma de arame.	63
Tabela 5 - Níveis reais e codificados dos fatores em estudo: U (tensão de referência) , Va (velocidade de alimentação do arame) e Vs (velocidade de soldagem).....	68
Tabela 6 - Matriz de planejamento experimental 2^3 das variáveis de entrada no processo MIG.	69
Tabela 7 - Parâmetros mantidos constantes pelo Processo MIG.....	70
Tabela 8 - Níveis de Energia obtida pelo Processo MIG.	71
Tabela 9 - Níveis reais e codificados dos fatores em estudo.	72
Tabela 10 - Matriz de planejamento experimental 2^3 mais 3 ponto central.	73
Tabela 11 - Parâmetros mantidos constantes pelo Processo PTA	74
Tabela 12- Matriz de planejamento fatorial 2^3 e resultados obtidos por PTA-P.	79
Tabela 13 - Análise de variância para avaliação do reforço (r).	83
Tabela 14 - Análise de variância para avaliação da largura (L).....	86
Tabela 15 - Análise de variância para avaliação do índice de convexidade (IC)	89
Tabela 16 - Análise de variância para avaliação da penetração (P).	91
Tabela 17 - Análise de variância para avaliação da Diluição D(%).	95
Tabela 18 - Resultados da avaliação da resistência a corrosão.	100
Tabela 19 - Análise de variância para avaliação da resistência à polarização Rp	103
Tabela 20 - Análise de variância para avaliação do Potencial de corrosão. ..	105

Tabela 21 - Matriz de planejamento fatorial 2 ³ e resultados obtidos por MIG.	109
Tabela 22 - Análise de variância para avaliação do reforço (r)	113
Tabela 23 - Análise de variância para avaliação da largura (L).....	116
Tabela 24 - Análise de variância para avaliação do índice de convexidade (IC)	119
Tabela 25 - Análise de variância para avaliação da penetração (P)	122
Tabela 26 - Análise de variância para avaliação da Diluição D(%)	125
Tabela 27 - Resultados da avaliação da resistência a corrosão.	130
Tabela 28- Análise de variância para avaliação da Resistência à Polarização Rp.....	133
Tabela 29 - Análise de variância para avaliação do Potencial de corrosão ...	135
Tabela 30 - Resultados das medidas de polarização linear.	138

Lista de Símbolos & Abreviações

A	Ampare
A1	Área de seção transversal que representa o reforço de um cordão de solda
A2	Área de seção transversal que representa a penetração de um cordão de solda
D	Diluição
Ecorr	Potencial de corrosão
H	Energia de Soldagem
I	Corrente de soldagem
r	Reforço (altura do revestimento)
Rp	Resistência a polarização
Tx	Taxa de alimentação
U	Tensão
Va	Velocidade de alimentação de arame
Vs	Velocidade de soldagem

Letras Gregas

η	Eficiência do processo de soldagem
Ω	Unidade de resistência elétrica (Ohm)

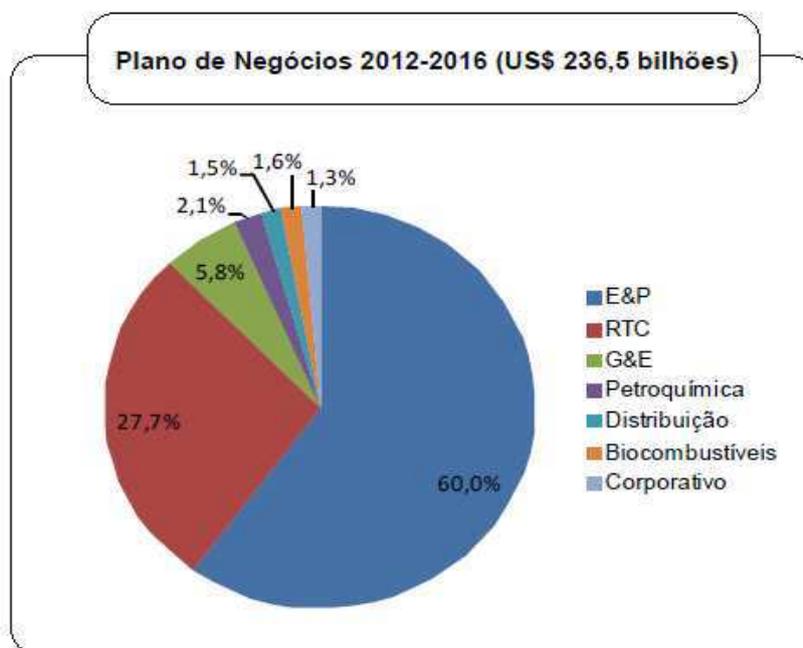
Siglas

API	Instituto Americano de Petróleo (<i>American Petroleum Institute</i>)
CC	Corrente Contínua
DBCP	Distância do bico de contato à peça
DBP	Distância do Bocal à Peça
EDX	Energia dispersiva de raios-X
MIG/MAG	Metal Inert Gás/Metal activo Gás
PTA-P	Plasma arco transferido alimentado com Pó
HV	Dureza Vickers (<i>Hardness Vickers</i>)
PPL	Polarização Potenciodinâmica Linear
ZTA	Zona termicamente afetada

1 INTRODUÇÃO

No cenário brasileiro as atividades da exploração de petróleo vêm crescendo de forma intensa e se direcionam cada vez mais para águas profundas, geralmente localizadas distante da costa (DOTTA; VIEIRA; SAMPAIO, 2012). Impulsionada pelas novas descobertas das reservas do pré-sal, a produção estimada de petróleo e gás natural no Brasil deve praticamente dobrar até 2020. A Petrobrás prevê investimentos de US\$ 236,5 bilhões (R\$ 416,5 bilhões) no período entre 2012-2016, conforme o seu Plano Estratégico 2012-2016 mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Previsão de Investimentos pela Petrobras no período 2012-2016.



Fonte: PETROBRAS; Plano de Negócios 2012-2016.

Em função dos altos volumes previstos de produção de petróleo e gás nestas novas áreas de exploração, é necessário realizar melhorias contínuas dos materiais empregados nos dutos utilizados nestas áreas, uma vez que em trabalho offshore, o ambiente e as substâncias ácidas conduzidas provocam severa ação corrosiva.

Os aços utilizados especificamente na fabricação de tubos para linhas transportem de petróleo e gás natural das indústrias do petróleo estão

classificados segundo a API (American Petroleum Institute) em função de sua aplicação, composição química e resistência mecânica e seguem a classificação API 5L (Specification for Line Pipe Steel, 2000).

Estes aços devem possuir elevada resistência, boa tenacidade a baixas temperaturas e boa soldabilidade. O baixo teor de carbono, o qual é compensado pela adição de elementos de liga que mantêm a resistência mecânica, aumenta a tenacidade e melhora a soldabilidade (RAMIREZ, 2008). Os aços que apresentam estas características são os aços microligados de alta resistência e baixa liga, conhecidos como Aços ARBL.

Além das propriedades mecânicas que devem ser garantidas, outro aspecto é de extrema importância, é a resistência à corrosão, pois os componentes utilizados para o transporte de petróleo sofrem algumas falhas em função do fenômeno da corrosão devido da agressividade do meio marinho, como também ao elevado índice de acidez encontrado no petróleo. Essas falhas provocam grandes prejuízos econômicos e danos irreparáveis ao meio ambiente. Com isso, a indústria do petróleo e gás natural no Brasil vem buscando alternativas no sentido de reduzir os custos ao minimizar os desgastes causados pela corrosão em suas unidades de refino e processamento de petróleo. Uma das alternativas mais utilizadas é a aplicação de revestimentos com ligas de alta resistência à corrosão por processos de soldagem.

A principal variável relacionada com a eficiência do revestimento com relação a sua resistência à corrosão, além da sua composição química é a diluição. Esta por sua vez dependerá dos parâmetros e do processo de soldagem utilizado. Os processos mais utilizados para este fim são os processos convencionais, o processo ao Arco com Proteção Gasosa (GMAW), com Eletrodo Revestido (SMAW) e com Eletrodo de Tungstênio e Proteção Gasosa (GTAW).

O processo Plasma Pó (PTA-P Plasma Transferred Arc – Powder) é um processo relativamente recente que possui características que podem ser muito benéficas quando aplicadas como revestimento, pois devido à fusão do pó ocorrer antes de atingir o substrato pode proporcionar baixos valores de diluição e, conseqüentemente baixos valores de Fe na superfície melhorando a resistência à corrosão. Além disso pode proporcionar menores valores de

tensões residuais e melhor homogeneidade dos cordões de solda depositados o que também beneficia aquela propriedade.,

1.1 Justificativa

Diante da problemática exposta, é de fundamental importância aumentar a durabilidade e até mesmo viabilizar a aplicação de ligas metálicas em componentes, nos quais se deseja elevada resistência à corrosão e ao desgaste dos dutos de transporte de petróleo que operam em ambientes agressivos.

Recentemente as ligas de níquel vêm sendo aplicadas como uma das alternativas para adequar componentes metálicos que compõem os equipamentos das unidades de produção e refino. As ligas de níquel são aplicadas através da técnica de revestimento soldado por apresentarem excelente resistência à corrosão.

Para isto, pesquisas vêm sendo desenvolvidas através de procedimentos de soldagem de sistemas das indústrias pertencentes ao setor de petróleo e gás. Recentemente, o processo de **soldagem por plasma arco transferido, Plasma Pó**, vem sendo amplamente utilizado para aplicação de revestimentos contra corrosão e ao desgaste, no qual tem mostrado resultados eficientes devido a algumas de suas características funcionais, tais como permitindo melhores resultados em relação a outros processos de soldagem convencionais atualmente aplicados em revestimentos, em relação, por exemplo, à baixa diluição e alta qualidade superficial.

Portanto, o presente trabalho apresenta uma pesquisa voltada à aplicação de revestimentos a base de ligas de níquel aplicadas por **soldagem com arco Plasma transferido com alimentação em pó, (PTA-P)** considerando o efeito dos parâmetros do processo de soldagem sobre características geométricas (largura, reforço, índice de convexidade e penetração), microdureza, microestrutura, diluição, e por fim análise da resistência à corrosão destes revestimentos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar a resistência à corrosão de revestimentos a base de ligas de Níquel aplicados pelos processos de Soldagem a Plasma Pó e MIG em aços API 5L X70.

2.2 Objetivos Específicos

- Encontrar os melhores parâmetros dos processos de soldagem que proporcionem um cordão de solda com o melhor perfil geométrico, principalmente com baixa diluição, utilizando Planejamento Experimental Fatorial;
- Avaliar a microdureza, a microestrutura e a composição química dos revestimento variando os parâmetros dos processo de Soldagem;
- Avaliar a resistência à corrosão dos revestimentos através da técnica de Polarização Potenciodinâmica Linear e Espectroscopia de Impedância Eletroquímica.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Aços ARBL

Com o crescimento da exploração do petróleo e do gás natural, as empresas do setor petrolífero tem determinado a busca de materiais para malhas dutoviárias que são responsáveis pelo transporte de petróleo e seus derivados, que apresentem boas propriedades mecânicas (SANTOS NETO, 2003). Dentre os materiais empregados para a fabricação de tubulações das redes dutoviária, os aços ARBL destacam-se por atender as exigências do setor.

Os Aços ARBL são aços microligados conhecidos como aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), que por meio de pequenas adições de elementos de liga apresentam valores de limite de escoamento acima de 40ksi (276 MPa) na condição laminado, apresentando como principal característica uma boa relação entre resistência mecânica e tenacidade, a qual são atribuídas a fatores como composição química, controle do processo termo-mecânico de fabricação e microestrutura final adequados (ZHAO *et al.*, 2002).

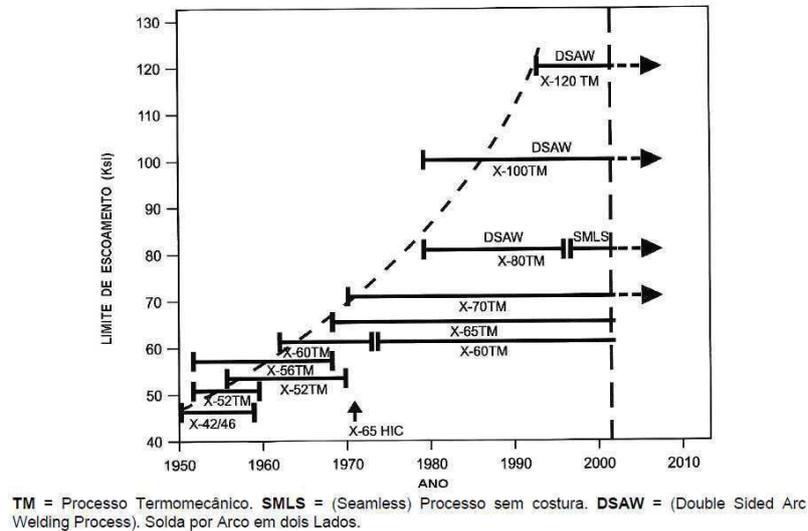
O uso dos aços ARBL apresenta como umas das principais vantagens à espessura da parede dos tubos, a qual pode ser diminuída para a mesma pressão interna, reduzindo assim o peso e os custos envolvidos no transporte e montagem (BAI & BAI, 2005). Outra possibilidade é manter a espessura de parede do tubo inalterada e elevar a pressão interna (até o limite máximo de 72% do limite de escoamento do tubo), aumentando o volume de produto transportado (SICILIANO, 2008).

Com a crise do petróleo ocorrida entre os anos de 1975 e 1985, surgiu a grande necessidade da exploração de petróleo em regiões mais frias. Diante disto, aumentou as exigências em termos de tenacidade e soldabilidade do material, o que significa um aumento em sua resistência mecânica (GORNI & Silveira, 2005).

A Figura 2 mostra o crescimento dos valores do limite de escoamento dos aços ARBL no período de 1950 a 2000, valores estes apropriadas para o setor de exploração de petróleo e gás, permitindo assim sua utilização na

confecção de tubos de maiores espessuras e diâmetros, ou equipamentos suportando maiores pressões (MALCOLN, 2007).

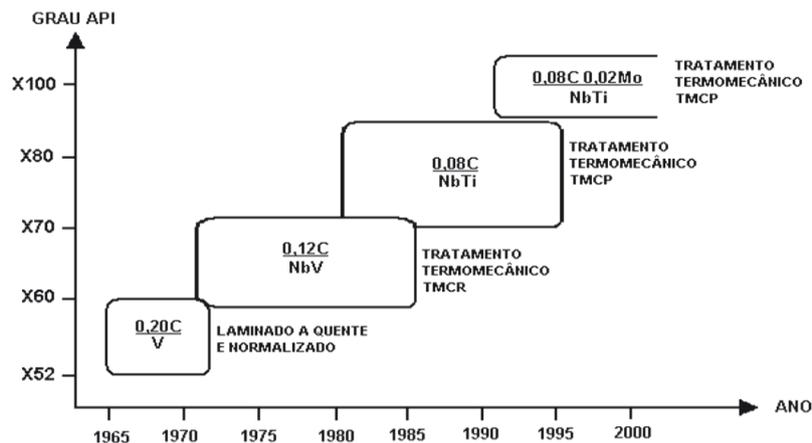
Figura 2 - Evolução dos ARBL e processos de fabricação dos tubos API 5L.



Fonte: (MALCOLN, 2007)

No período de evolução da produção dos aços ARBL, diversos fatores foram abordados para o desenvolvimento contínuo das suas propriedades, dentre elas o controle ou adição de alguns elementos de liga e a utilização de processos de fabricação para controle da microestrutura, para melhoria das propriedades dos aços ARBL (SICILIANO, 2008). A Figura 3 mostra o desenvolvimento dos ARBL a partir do ano de 1965 até o ano 2000.

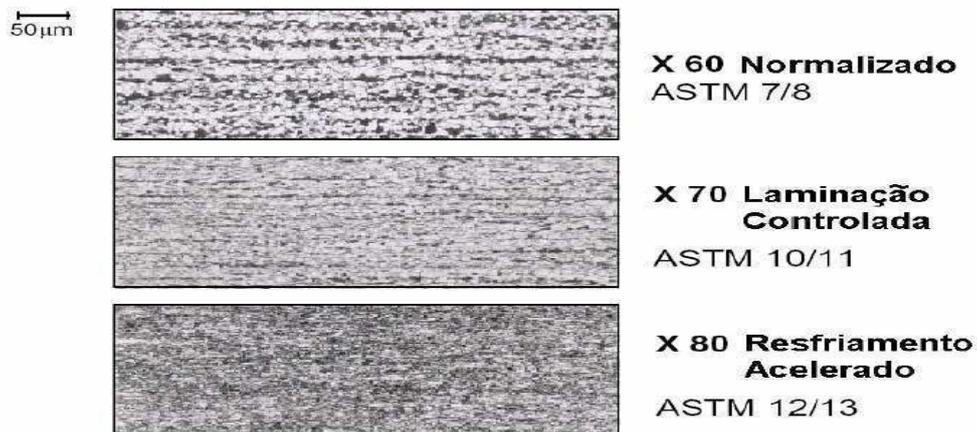
Figura 3 - Desenvolvimento dos ARBL com os principais elementos de liga.



Fonte: (SICILIANO, 2008).

A evolução dos aços API em termos microestruturas é ilustrada através da Figura 4, onde é possível verificar a redução do tamanho de grão e a sua correlação com o processo termomecânico utilizado (HILLENBRAND & KALWA, 2002 apud ROSA, 2011)

Figura 4 - Evolução do tamanho de grão obtido pelos diferentes processos de laminação.



Fonte: (HILLENBRAND & KALWA, 2002 apud ROSA, 2011)

Os aços ARBL são classificados segundo API (American Petroleum Institute), em função de sua aplicação, composição química e resistência mecânica, aliado à boa soldabilidade na fabricação de aços e tubos para produção de dutos. A boa soldabilidade garantida destes materiais está

relacionada com o baixo teor de carbono, quando comparados aos aços carbono convencionais, para a mesma resistência mecânica (SOEIRO JUNIOR, 2013).

Para que um tubo possa ser enquadrado dentro das especificações, deve atender aos requisitos associados a sua aplicação, composição química e resistência mecânica (API 5L, 2000).

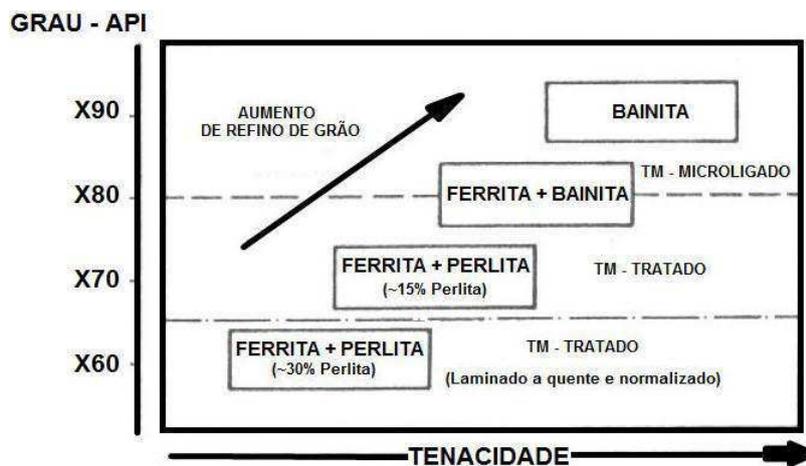
3.1.1 Aço API 5L X70

Mundialmente, desde a década de 80 até os dias atuais o aço ARBL API 5L X70 tornou-se o aço padrão para fabricação de tubos destinados construção de malhas dutoviárias. O primeiro duto utilizando tubos de aço API 5L X70 foi construído na Alemanha ainda na década de 70. Entretanto, o futuro aponta para a redução de seu uso em favor de chapas de aço com graus superiores. (HULKA, 2013)

O grau API 5L indica o limite mínimo e máximo de resistência ao escoamento para estes aços, assim o aço API 5L X70 possui um mínimo de resistência ao escoamento da ordem de 70 Ksi (483 MPa), e máximo da ordem de 90 Ksi (621 Mpa).

A estrutura mais comumente encontrada nos aços API 5L X70 é do tipo ferrítica-perlita permitindo boas propriedades de resistência e tenacidade. Observa-se na Figura 5 o ganho de tenacidade associado com o tipo de microestrutura presente, resultado do processo de fabricação empregado no desenvolvimento destes aços (DeARDO, 1995).

Figura 5 - Microestrutura presentes no desenvolvimento de aços API.



Fonte: (DeARDO, 1995).

Como os aços API 5L X70 são utilizados em dutos para transporte de petróleo, os tubos estão submetidos a condições severas de corrosão e desgaste. Apesar das boas propriedades mecânicas apresentadas anteriormente, esse material é susceptível a corrosão, e como o líquido a ser transportado, petróleo, possui em sua composição química diversas impurezas e um elevado grau de corrosividade, promove corrosão no duto.

Assim, novos estudos e tecnologias estão sendo empregados, visando uma melhoria das propriedades destes componentes. Atualmente está sendo empregada a nível mundial, a técnica de revestimento soldado de composição química distinta daquela do metal de base (dutos) com o objetivo de alcançar na superfície propriedades específicas e que o substrato não possui. A deposição de uma variedade de materiais que podem ser aplicados como revestimentos internos, entre os materiais mais importantes destacam-se as superligas a base de níquel e a base de cobalto. As superligas a base de níquel são conhecidas pela excelente resistência à corrosão em elevadas temperaturas (BOND, 2011).

3.2 Níquel e suas ligas

3.2.1 Níquel

Dentre os elementos químicos mais abundantes na Terra, o níquel é o quinto, na tabela periódica está situado na primeira fileira dos metais de transição, ao lado do ferro e do cobalto. É um metal de massa atômica 58.71 u, número atômico 28 e apresenta estrutura cristalina cúbica de face centrada, CFC, em condições ambientes, com ponto de fusão 1455°C e massa específica 8,9 g/cm³ (REED, 2006). A Tabela 1 apresenta as propriedades do níquel.

Tabela 1 - Propriedades do níquel.

Propriedades do Níquel	
Densidade (g/cm ³)	8,89
Ponto de Fusão (° C)	1453
Coef. Exp. Térmica (20 ° C) (1/° C)	1,33 x 10-5
Cond. Térmica (25 ° C) (W/mK)	92
Resistividade (m)	7 x 10-8
Módulo de Elasticidade (GPa)	204

FONTE: (REED, 2006).

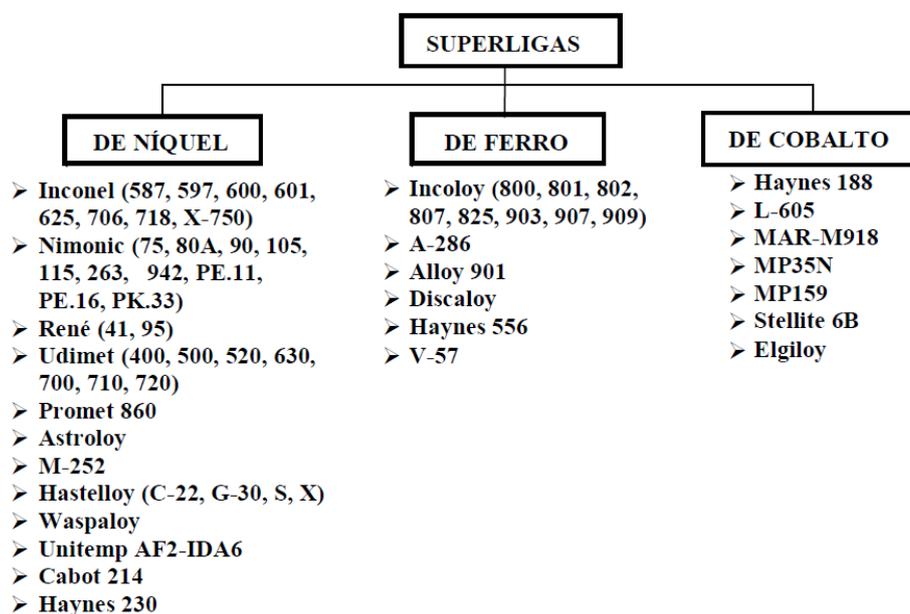
O níquel e suas ligas são extremamente importantes na indústria em virtude da habilidade de resistirem a uma variedade de condições extremas de operação, as quais envolvem meios corrosivos, elevadas temperaturas e/ou alta tensão (ASM, 2000).

Uma das grandes desvantagens do níquel está no seu elevado custo, fazendo com que não seja viável a produção de componentes maciços com essas ligas.

3.2.2 Superligas

As superligas são projetadas para prover elevada resistência mecânica e à corrosão em altas temperaturas. Elas combinam boa resistência à fadiga e à fluência, bem como ductilidade e rigidez. A Figura 6 mostra a classificação das superligas, onde existem três principais classes de superligas: de níquel, de ferro e de cobalto (CHOUDHURY, EL-BARADIE, 1998).

Figura 6 - Classificação das Superligas.



Fonte: Adaptado de (CHOUDHURY & EL-BARADIE, 1998).

3.2.2.1 Super Liga de Níquel

As Superligas de níquel constituem uma importante classe de materiais de engenharia, por combinarem elevada resistência mecânica à alta temperatura com excelente resistência à corrosão, o que as tornaram bastantes atrativas nas aplicações em elevadas temperatura (PEREPEZKO, 2009).

Normalmente as superligas de níquel contêm elementos como cromo, molibdênio, ferro, cobalto, tungstênio e nióbio. Algumas ligas tem elevada tenacidade e resistência a temperaturas sub-zero, já outras possui elevada resistência até 1200°C, mantendo a resistência à corrosão (PFINGSTAG, 2009).

O desenvolvimento da Liga NiCrMo-3, comercialmente conhecida como liga Inconel 625, vem a partir da necessidade de atender a demanda de materiais de alta resistência mecânica e corrosão para uso no seguimento de exploração e refino do petróleo, com implantação comercial desta liga entre os anos de 1962 e 1963 (PÉREZ,2005;KEJELIN, 2006).

Inconel 625 é uma liga de Níquel-Cromo-Molibdênio com uma adição de nióbio e titânio, a qual funciona como estabilizador de elementos para fixar o carbono contra sensitização à corrosão intergranular. A elevada resistência à corrosão é devido principalmente à estrutura em camadas de óxido de passivação que se formam sobre a superfície de Inconel 625, que protege o material de corrosão subsequente (WALSH & Bakare , 2009; Yin et al.2009).

Atualmente o uso das ligas de níquel vem sendo bastante sugerido como alternativa para ajustar ou suprir componentes metálicos da indústria do petróleo (PESSOA et. al, 2010).

Os custos de fabricação de componentes e/ou equipamentos maciços por estas ligas são elevados, fazendo com que os mesmos sejam normalmente produzidos com materiais menos nobres, como aços C-Mn e baixa liga e posteriormente revestidos com materiais de excelente resistência à corrosão. (PESSOA et. al, 2010).

A técnica do revestimento por soldagem vem sendo bastante abordada nos últimos anos, utilizando as superligas de níquel como metal de adição em processos de soldagem para revestir componentes e equipamentos da indústria do petróleo e gás natural.

3.3 Soldagem

A Soldagem é definida como a técnica de unir duas ou mais partes assegurando continuidade e as características mecânicas e químicas do material (WAINER, 1992).

Os processos de soldagem podem ser divididos em duas categorias: processos por fusão e os por pressão (deformação). Os processos por fusão é caracterizado na aplicação localizada de calor na região de união até a fusão do metal base juntamente com o metal de adição (quando este é utilizado), destruindo as superfícies de contato e produzindo a união pela solidificação do metal fundido. Por outro lado, os processos por deformação consistem em deformar as superfícies de contato permitindo a aproximação dos átomos a distâncias muito pequenas (MARQUES et al., 2009).

Dentre os processos de soldagem por fusão, mais utilizados, podemos destacar: Soldagem ao Arco Elétrico com Eletrodos Revestidos (Shielded Metal Arc Welding - SMAW); Soldagem MIG/MAG (Metal Inert Gás/Metal Active Gas); Soldagem ao Arco Elétrico com Eletrodo de Tungstênio e Proteção Gasosa (TIG); Soldagem ao Arco Elétrico com Eletrodo Tubular (FCAW); Soldagem ao Arco Submerso (SAW), Soldagem ao Arco Plasma (PAW) e mais recentemente o Processo de Soldagem a Plasma com Arco Transferido (PTA).

Além das aplicações convencionais de soldagem (soldagem de união), o processo de soldagem pode ser utilizado para soldagem de revestimento, o qual diz respeito à geometria do cordão de solda. Ao contrário das aplicações tradicionais, embora seja desejável elevada penetração para garantir a resistência da junta soldada, na soldagem de revestimento o perfil geométrico desejado se resume em grandes larguras do cordão, baixos reforços, baixas penetrações e baixos percentuais de diluição (ASME IX, 2007).

3.3.1 Soldagem de Revestimento

O comprometimento de equipamentos que operam em ambientes agressivos pelos fenômenos da corrosão e desgaste proporciona perdas significativas, seja com relação à falhas ocorridas na linha de produção (falha materiais e ao meio ambiente) ou paradas para manutenção em curto intervalo de tempo.

Diante do exposto a técnica de soldagem para revestimento tem-se mostrado como uma das alternativas bastante eficazes, tanto para recuperar, quanto para prevenir as diversas formas de desgaste de equipamentos metálicos. Assim a soldagem de revestimento pode ser definida como a deposição de um material de adição dissimilar sobre uma superfície metálica para se obter propriedades que não são encontradas no material de base. Essa soldagem tem por objetivo, geralmente, um aumento na resistência à abrasão e/ou corrosão do metal base.

Portanto, a soldagem de revestimento vem assumindo cada vez mais a importância por possibilitar o reparo em componentes avariados e, também, por permitir o aumento da vida útil dos componentes pela deposição de camadas protetoras, propiciando a redução no tempo de paradas não programadas (ALCÂNTARA et. al, 2002). De acordo com a literatura as principais razões para se realizar técnica de um revestimento de superfície por soldagem podem ser resumidas da seguinte maneira (LINNERT,1995 apud FRATARI,2010):

- (i) Reconstrução do material de base para reparar a forma e ajustar as dimensões de uma peça;
- (ii) Amanteigamento de uma superfície de um metal de base com camadas de um material dissimilar, que servirá como camada de transição quando a junta subsequente for executada sobre a camada amanteigada;
- (iii) Endurecimento superficial com uma camada de composição dissimilar que, por si só, propicia aumento na resistência ao desgaste;
- (iv) Revestimento do metal de base com a deposição de uma camada com composição química dissimilar, que proporcionará ao metal de base diferentes

propriedades químicas, físicas e/ ou metalúrgicas, tais como resistência à corrosão, propriedades magnéticas e elétricas.

A seleção do processo de soldagem para a aplicação de um revestimento depende de alguns fatores tais como versatilidade, custo, tempo operacional, energia de soldagem, diluição (%), taxa de deposição (kg/h), dimensões da peça, posição de soldagem, tipo de liga para revestimento (WAINER, 1992).

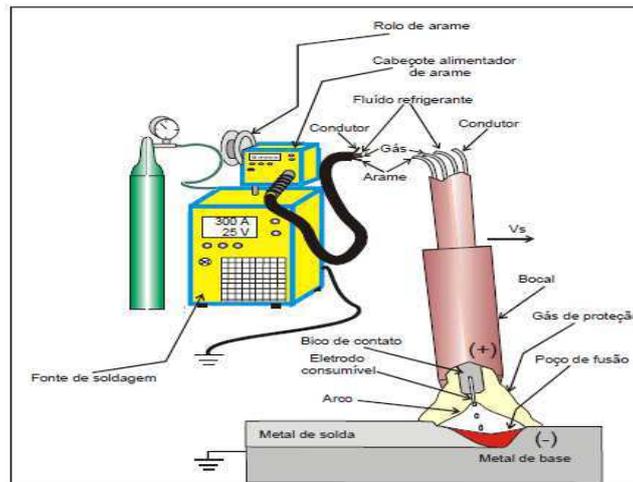
3.3.2 Processo MIG

De acordo com a Associação Americana de Soldagem (AWS, 1990), o processo de soldagem MIG/MAG (Meta Inert Gás/Metal Active Gas) consiste em estabelecer um arco elétrico entre um arame-eletrodo e a peça metálica a ser soldada ou revestida, em que a alimentação do arame-eletrodo é realizada mecanicamente através de um alimentador motorizado.

O calor gerado pelo arco funde a extremidade do eletrodo e a superfície do metal de base para formar a poça de fusão, a qual é protegida do ar atmosférico utilizando um gás de proteção ou mistura de gases, que podem ser inertes ou ativos, o qual caracteriza o nome do processo MIG/MAG, dependendo do gás usado, MIG representa *Metal Inert Gas* (proteção através de um gás ou mistura inerte) ou MAG, *Metal Active Gas* (mistura de um ou mais dos gases ativos). O processo pode ser semiautomático, mecanizado ou automático. Todos os metais comercialmente importantes, tais como, aços carbono, aços ligados, aços inoxidáveis, alumínio, cobre e suas ligas, níquel e suas ligas, podem ser soldados através deste processo.

A Figura 7 apresenta o esquema do equipamento para soldagem pelo processo MIG/MAG e a representação da poça de fusão formada durante a soldagem.

Figura 7 - Esquema do Equipamento do processo MIG/MAG.



Fonte: (BARRA, 2003).

Conforme Nilo Jr. (2003), as variáveis influenciam nas características finais do cordão de solda, dentre elas podemos destacar-se corrente de soldagem, a tensão, a velocidade de soldagem, o comprimento (*stick-out*) e diâmetro do arame-eletrodo, a inclinação da tocha de soldagem, o gás de proteção e a velocidade de alimentação do arame.

3.3.2.1 Variáveis de Soldagem do Processo MIG/MAG

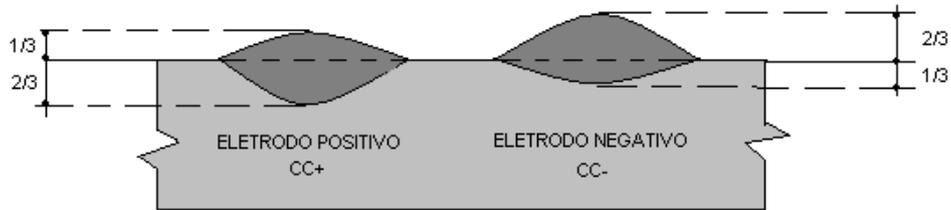
3.3.2.1.1 Corrente

As fontes de energia eletrônicas são adequadas para controlar o formato da onda de corrente o que trouxe novas possibilidades aos processos TIG, Plasma e MIG/MAG (Oliveira, 2006).

No processo MIG/MAG a corrente de soldagem pode ser contínua constante ou contínua pulsada, sendo que o emprego da corrente pulsada objetiva-se principalmente o controle do modo de transferência metálica.

Quando é invertida a polaridade de positiva para negativa, a tensão deve aumentar em torno de quatro volts sem alterar a corrente para obter uma forma de cordão similar. A Figura 8 mostra o efeito da polaridade do eletrodo na soldagem (WAINER, BRANDI & MELLO, 1992).

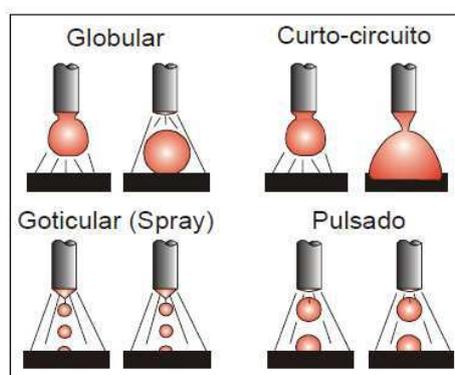
Figura 8 - Efeito da polaridade do eletrodo sobre o cordão de solda, mantidos constantes os demais parâmetros



Fonte: (WAINER, BRANDI & MELLO, 1992).

A corrente de soldagem tem influência na taxa de deposição, no modo de transferência metálica e nas características geométricas do cordão. Sendo assim, a corrente vai depender da espessura das peças a serem unidas, do diâmetro do eletrodo e das características desejadas dos cordões de solda (Nilo Jr., 2003). Conforme citado por SCOTTI (2009) existem quatro tipos de modos de transferência metálica na soldagem MIG/MAG, ver Figura 9, que são denominados de: globular, curto-circuito, goticular (spray) e pulsado. Estes modos são caracterizados pelo tamanho e frequência de destacamento das gotas fundidas. Os modos de transferência estão associados a diversos fatores, incluindo o nível de corrente, diâmetro do arame, comprimento do arco, nível de tensão, características da fonte de energia e gás de proteção. Os três primeiros tipos citados anteriormente são classificados como modos de transferência naturais, enquanto que o quarto modo é considerado como controlado.

Figura 9 - Modos de transferência metálica na soldagem MIG/MAG.



Fonte: (BARRA, 2003).

3.3.2.1.2 Tensão de Soldagem

A Tensão de soldagem está diretamente relacionada ao comprimento do arco, ou seja, mantendo as demais variáveis constantes, um aumento da tensão do arco proporciona um aumento do comprimento do arco. No entanto, o mesmo comprimento do arco pode 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).

3.3.2.1.3 Velocidade de Alimentação

No processo MIG/MAG a variável velocidade de alimentação do arame produz o fluxo de corrente, sendo, portanto uma das variáveis mais importantes no processo.

WAINER, BRANDI e MELLO, 1992 *apud* SILVA (2012) mostram que existe uma relação direta entre a velocidade de alimentação do arame com a corrente de soldagem e uma relação inversa destas com o comprimento de arco, para uma mesma tensão. Assim, a sua utilização correta garante cordões com boas características geométricas sem defeitos. O uso de elevados valores da velocidades de alimentação acarreta valores de correntes de soldagem elevados, o que pode acarretar o aparecimento de defeitos do tipo: mordeduras e deformações no metal de base. Por outro lado, baixos valores de velocidades acarretam a falta de penetração, a falta de fusão em soldagem multipasses e um formato irregular dos cordões de solda.

3.1.2.1.4 Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem é a velocidade de deslocamento do arco elétrico ao longo do comprimento da junta ou revestimento. Para maiores velocidades ocorre uma menor penetração e para menores velocidades de soldagem temos maior penetração, da mesma forma ocorre para a largura e a altura do reforço do cordão. A diminuição da penetração, largura com a velocidade está associada com a energia de soldagem, ou seja, a diminuição da quantidade de energia fornecida por unidade de comprimento da junta. Por outro lado, a diminuição da altura do reforço está associado a redução do material (MODENESI, 2005).

3.1.2.1.5 Ângulo de Ataque

O ângulo de ataque da tocha é considerado “puxando” se sua inclinação é concordante com o sentido de deslocamento da soldagem, ou “empurrando” se é discordante deste sentido. De acordo com (SILVA , 2012),(ver observação anterior com relação à referência)) o ângulo de ataque determina a direção na qual a força do arco é aplicada na poça de fusão. O direcionamento da força do arco é utilizado para auxiliar na configuração desejada do cordão de solda. Com a utilização do gás de proteção em soldas planas, é usual o emprego de um ângulo de deslocamento entre 2° a 15° em ângulo positivo, o que auxilia em uma maior penetração do cordão de solda e na formação de um reforço convexo. A Figura 10 ilustra o ângulo de ataque em relação ao sentido de soldagem e descreve as principais características da soldagem.

Figura 10 - Influência do ângulo de deslocamento na soldagem MIG/MAG

Ângulo	Características	Soldagem
Ângulo Negativo - Arco Frio	<ul style="list-style-type: none"> • Menor penetração • Mais respingos • Cordão de solda mais plano • Cordão de solda mais largo • Melhor visibilidade para o soldador 	<p>Direção de soldagem →</p>
Ângulo Positivo - Arco Quente	<ul style="list-style-type: none"> • Maior penetração • Menos respingos • Cordão de solda mais estreito • Cordão de solda mais convexo • Arco mais estável 	<p>Direção de soldagem →</p>
Ângulo Neutro	Neste caso, as características de soldagem e do cordão de solda são intermediárias aos dois casos anteriores.	<p>Direção de soldagem →</p>

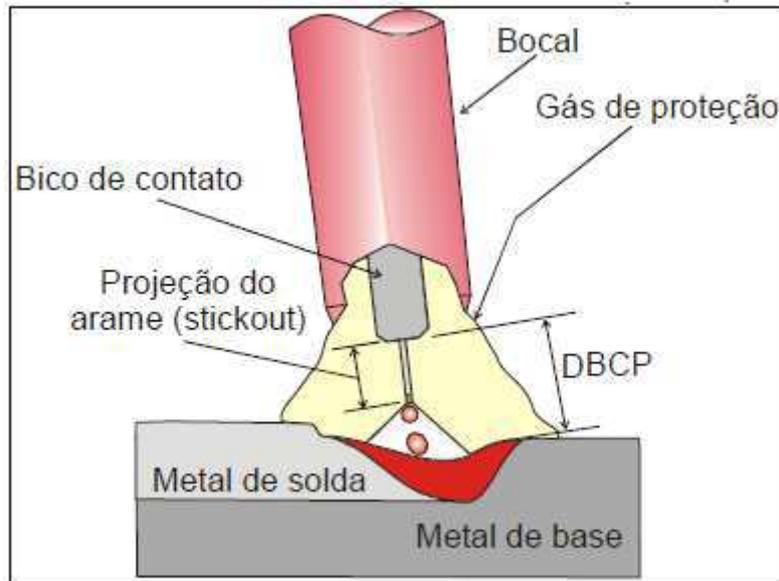
Fonte: Adaptado de Nilo Jr., 2003.

3.1.2.1.6 Comprimento do Arame-eletrodo (Stick-out) e DBCP

O *stick-out* é o comprimento energizado do arame, medido do bico de contato até a formação do arco elétrico. A variação da DBCP afeta diretamente o tamanho do arame-eletrodo (*stick-out*) e do comprimento do arco elétrico, gerando variações que podem produzir mudanças significativas na corrente e na frequência de transferência metálica (MODENESI,2005).

Com o aumento do *stick-out*, proporciona uma elevação no aquecimento do arame-eletrodo pelo efeito Joule e, conseqüentemente, gera menores penetrações e geometria do cordão inadequada. Outro inconveniente do *stick-out* elevado é a redução da proteção gasosa caso da utilização de baixa vazão de gás de proteção. A Figura 11 mostra a representação da distância do bico de contato peça – DBCP e da projeção do arame (Stick-out).

Figura 11 - Representação da distância do bico de contato peça – DBCP e da projeção do arame (Stickout).



Fonte: (Barra, 2003)

3.3.2.1.7 Diâmetro do Arame

Santos, Oliveira e Dutra, 2002, conforme resultados obtidos informam que quanto maior o diâmetro do arame maior será a corrente necessária para sua fusão e maior a taxa de fusão (kg/h).

3.3.2.1.8 Gás de Proteção

O efeito do gás de proteção nos processos de soldagem a arco elétrico é de fornecer um meio adequado para a operação estável e sustentar um arco em baixa voltagem e proporcionar proteção contra a contaminação atmosférica. Além disso, o gás de proteção tem a função de controlar a geometria do cordão de solda e as propriedades mecânicas (NORRISH, 1992 apud NASCIMENTO et al 2012).

Assim, o gás de proteção tem uma influência significativa sobre o perfil do cordão de solda e as características de fusão. A área fundida total é

aumentada (em uma corrente equivalente) pelo uso de gases que aumentam a energia do arco.

Os gases mais utilizados para a proteção da soldagem MIG/MAG são o argônio, o hélio, o dióxido de carbono e o oxigênio, ou a mistura entre eles (SCOTTI & PONOMAREV, 2008; PESSOA, 2009).

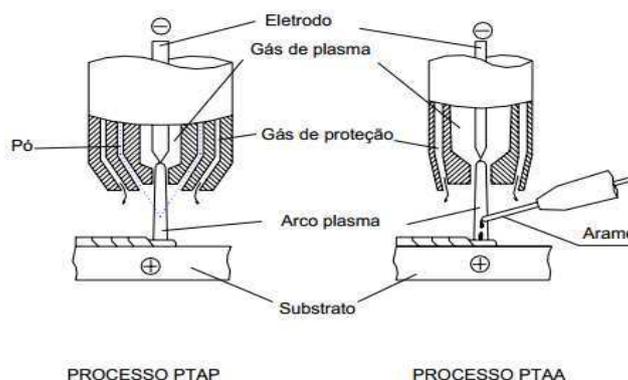
3.3.2 Soldagem PTA-P

O Processo de soldagem a Plasma com Arco Transferido Alimentado com Pó, PTA-P, foi desenvolvido na década de 1960 a partir do processo de soldagem com arco plasma (VEINTHAL et al., 2013).

O Processo PTA-P pode ser considerado uma derivação do processo PAW (plasma arc welding), o qual consiste na união por fusão das partes a serem unidas através de um arco elétrico formado entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e o substrato ou bico constritor (MARQUES et al., 2009). Por sua vez, o arco é constrito através de um bico constritor de cobre que tem a função de colimar o arco elétrico. O plasma é formado pela porção do gás de plasma que atravessa o orifício do bocal constritor. (ASM Handbook, 1993).

A Figura 12 apresenta um esquema comparativo entre os processos de soldagem PTA-P e PAW, os quais utilizam um eletrodo de tungstênio não consumível que fica no interior da tocha, um bico constritor refrigerado a água, gás de proteção para a poça fundida e o gás de plasma. A diferença entre ambos os processos de soldagem está na natureza do metal de adição. No caso do PTA-P o metal de adição é um pó em vez de arame, o qual requer um gás para o seu transporte até a região do arco (DÍAZ, 2010).

Figura 12 - Esquema comparativo entre os Processos PTA e PAW.



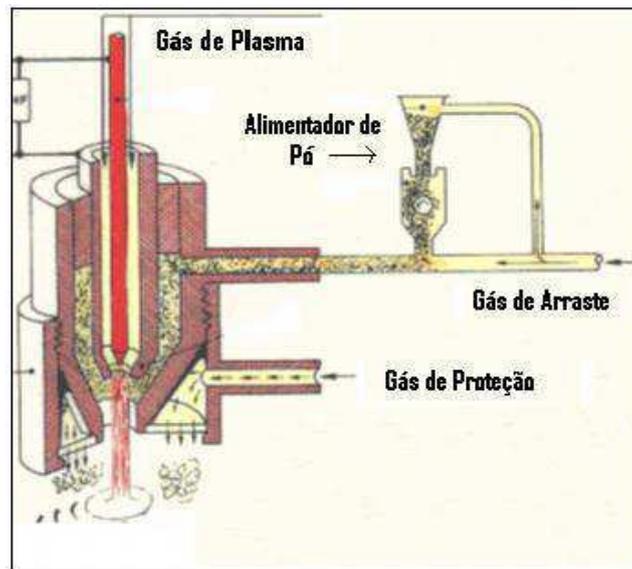
Fonte: (DAI et al, 2001)

A técnica de soldagem PTA-P é uma modalidade de soldagem mais apropriada para a produção de revestimentos. O termo plasma em sua denominação refere-se à atuação física do arco em consequência de detalhes construtivos da tocha de soldagem (ALVES, 2011).

Devido o eletrodo de tungstênio ficar confinado no interior do bico constritor na tocha de soldagem, a abertura do arco por contato é dificultada, assim é necessário à utilização de um equipamento chamado de módulo plasma, para a abertura do arco. Um ignitor eletrônico fornece picos de tensão entre o eletrodo de tungstênio e o bocal constritor, gerando um pequeno faiscamento nesta região. Assim, com a passagem do gás de plasma surge um arco elétrico de baixa intensidade entre o eletrodo de tungstênio e o bico constritor, chamado de arco piloto (arco não - transferido) (RIBEIRO, 2007). Através do orifício de restrição na extremidade do bico constritor o gás plasma (ionizado) é forçado a passar. O aumento da velocidade do jato plasma é consequência direta da constrição do bico. O arco voltaico colimado pelo bico constritor proporciona o aumento da densidade de energia e direcionalidade (Metals Handbook, 1998).

O material a ser depositado no processo de soldagem é transportado a partir do alimentador de pó até a tocha com o auxílio de mangueiras através de um fluxo de gás, conhecido como gás de arraste. Normalmente utiliza-se o argônio para esta finalidade, o qual é direcionado a tocha plasma conforme apresentado na Figura 13. O processo pode ser manual ou automático, sendo que para cada situação existe um tipo de tocha específico.

Figura 13 - Esquema do funcionamento da Tocha PTA-P.



Fonte: (<http://www.plasmateam.com>, 2013).

Sendo assim, os componentes de um equipamento PTA-P são:

- Uma fonte de corrente para o arco principal;
- Uma fonte de corrente para o arco piloto (com ignitor de alta frequência para sua ignição);
- Uma tocha de soldagem refrigerada;
- Um sistema para a alimentação de pó;
- Cilindros dos gases do processo e seus respectivos reguladores;
- Tartilope para deslocamento da tocha.

Os parâmetros que controlam a qualidade da solda são a taxa de alimentação do material de adição, a vazão dos gases (gás de proteção, gás de plasma, gás de transporte), a corrente de soldagem, a distância bico-peça e a velocidade de soldagem.

3.3.2.1 Variáveis de Soldagem do Processo PTA-P

3.3.2.1.1 Corrente

No processo PTA a corrente é a principal variável quando se considera o aporte de energia ao substrato. A corrente contínua constante com polaridade direta (CC-) é utilizada pelo maior aquecimento do metal de base e menor desgaste do eletrodo, devido ao menor aporte de energia destinado ao eletrodo que esta polaridade proporciona (MARQUES, 2009).

. Segundo (BOND et al., 2005), quando se trabalha com valores de corrente do arco principal demasiadamente altas (cerca de 250 A) ocorre redução da dureza e maior oxidação sobre o cordão, devida à elevada diluição. Outra consequência que deve ser levada em consideração neste caso é que as pequenas partículas do material de aporte são vaporizadas no arco plasma diminuindo o rendimento de deposição . Por outro lado, (BOND et al., 2005) também afirma que para valores de correntes muito baixos (cerca de 70 A) originam descontinuidades no cordão de solda do tipo falta de fusão apresentando pó nas laterais do cordão de solda.

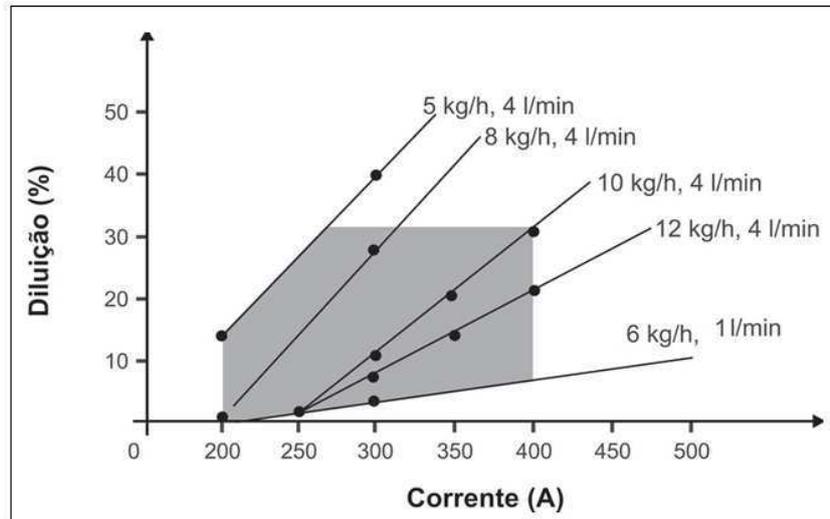
De acordo com (DEUIS et al., 1998), o valor de corrente considerado ótimo, é o menor valor de corrente que corresponde a fusão total do pó para determinada taxa de alimentação. Um valor menor seria insuficiente para fundir o pó ou a peça e, nesse caso, haveria falha na formação do cordão.

3.3.2.1.2 Taxa de alimentação do pó

A taxa de alimentação do pó tem grande importância no processo de deposição por PTA-P com relação à diluição. De acordo com o trabalho de Diaz (DÍAZ, 2005), verificou-se que à medida que se aumenta a taxa de alimentação do pó o grau de diluição diminui, fato este atribuído à maior quantidade de pó que alimenta a coluna do arco retirando mais calor da poça de fusão (Pavlenko, 1996 *apud* SILVA, 2012), .

O Gráfico da Figura 14 apresenta relação dos valores da diluição e corrente do arco principal sob diferentes taxas de alimentação de pó (HALLEN et al., 1991).

Figura 14 - Diluição versus Corrente de soldagem sob diferentes taxas de alimentação de pó e vazão de gás de arraste plasma



Fonte: (Hallen et al.,1991)

3.3.2.1.3 Velocidade de Soldagem

A variável velocidade de soldagem tem influência significativa na qualidade dos cordões soldas e apesar de não atuar diretamente nas características do arco, está relacionada com a quantidade de calor transferido à peça por unidade de comprimento.

De acordo com (SANTOS, 2003), com a variação da velocidade de soldagem e fixando os demais parâmetros, ocorrem mudanças no formato da poça de fusão, na microestrutura, no tamanho da ZTA e na oxidação superficial do cordão, sendo estas duas últimas características inversamente proporcionais ao aumento da velocidade.

Outro efeito relativo à velocidade de soldagem que pode ocorrer é a falta de penetração, porém no caso do PTA e outros processos com elevada concentração de energia, tais como laser e feixe de elétrons, e até mesmo em

condições especiais nos processos TIG (Tungstênio Inert Gás) e MIG (Metal Inert Gás), o excesso de penetração pode ocorrer, devido à variação do escoamento de calor no substrato (MACHADO, 1996).

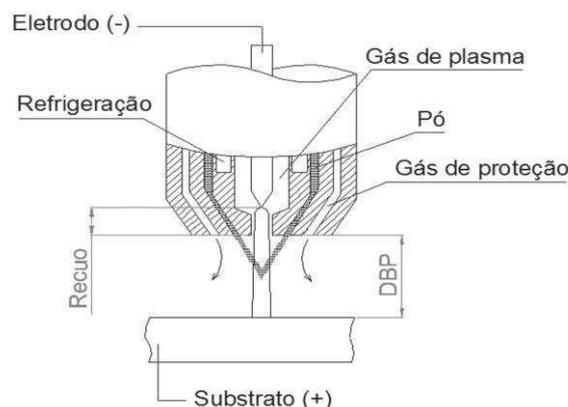
3.3.2.1.4 DBP, Recuo do eletrodo e Diâmetro do orifício do bico

A Distância do Bico- Peça (DBP) tem influencia significativa sobre as características do revestimento, pois de acordo com resultado de (DIAZ, 2010) com o aumento da DBP ocorre uma diminuição da energia e conseqüentemente a penetração é reduzida. A influência da DBP nos revestimentos também depende do recuo do eletrodo (Rc).

O Recuo do eletrodo (Rc) define o grau de constrição, rigidez do jato plasma e as alterações das características do arco. Quanto maior é o recuo adotado para o eletrodo e menor o diâmetro do orifício constritor, maior é o efeito de constrição do arco, tornando-o mais concentrado. Esta variável é medida a partir da ponta do eletrodo até a face externa do bico constritor, conforme ilustrado na Figura 15.

O diâmetro do orifício do bico constritor tem uma grande influência sobre a qualidade do revestimento pois está relacionado diretamente com a largura e penetração do cordão produzido.

Figura 15 - Distancia Bico-Peça (DBP) e Recuo do Eletrodo (Rc).



Fonte: (DIAZ, 2010)

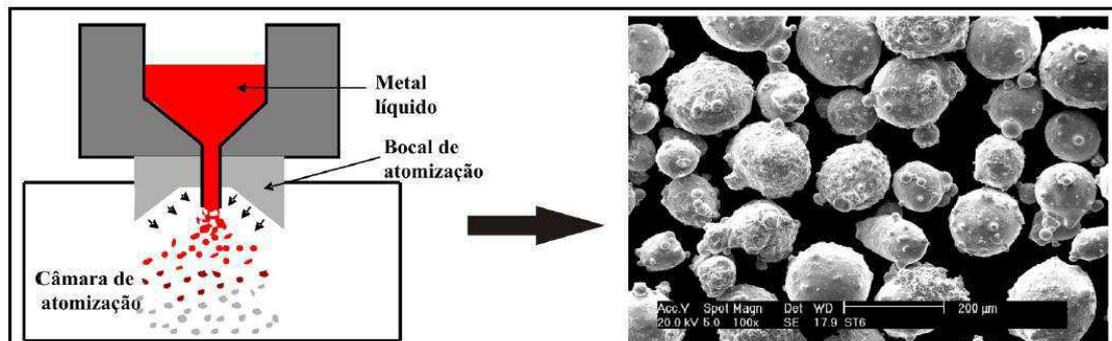
3.3.2.1.5 Granulometria do Pó

Para deposição por PTA-P as ligas metálicas em pó devem apresentar determinadas características que tornem seu processamento viável. Dentre elas podemos destacar a granulometria do pó.

Segundo (Wahl e Krauskopf, 1993 apud SILVA, 2012) para materiais ferrosos, deve-se utilizar partículas na faixa 60 μm a 200 μm que reduz os vapores metálicos. (Marconi, 2002) recomenda que evitem fazer uso de partículas muito grandes (acima de 150 μm), pois não fundem por completo, como também muito pequenas (abaixo de 63 μm), que são superaquecidas e vaporizadas.

Os pós metálicos normalmente utilizados na obtenção de revestimentos via PTA-P são obtidos por atomização ou trituração (ALVES, 2011). A Figura 16 esquematiza o processo de atomização para a produção de pós. Existem outros processos de produção de pós metálicos, porém, com menor expressão no mercado.

Figura 16 - Esquema do método de produção de pós.



Fonte: (ALVES, 2011)

3.3.2.1.6 Sistema de Gases

O processo de soldagem PTA-P agrupa três sistemas de gás. O primeiro é chamado de gás de plasma, o qual quase sempre é argônio devido ao seu baixo potencial de ionização, que é forçado a passar através do orifício do bico constritor, onde o eletrodo é fixado concentricamente. O segundo gás é

chamado de proteção, que tem como função principal proporcionar proteção da contaminação atmosférica a poça de fusão passa por um bocal externo, concêntrico ao bico constritor, atuando, efetivamente na proteção da solda contra a contaminação pelo ar. E o terceiro que proporciona o escoamento de gás, chamado de gás de arraste, é utilizado para carrear o material consumível durante a aplicação do revestimento (D'Oliveira, 2008 e DÍAZ,2010).

Segundo (HUANG et al.) o aumento de vazão de gás de plasma resulta em maior rigidez do arco, mas o excesso traz maior penetração acompanhada de prejuízo ao acabamento superficial, e maior velocidade do jato plasma e turbulência, causando menor eficiência do gás de proteção, irregularidade no transporte do pó, poros e inclusão de óxidos,

A vazão do gás de arraste influencia também na dispersão das partículas. Em muitos casos é possível, ao final da operação do revestimento, observar partículas de pó não fundidas aderidas nas laterais do revestimento (DÍAZ, 2010).

3.3.2.1.6 Características principais do processo

As principais características dos depósitos obtidos pelo processo PTA são (PLASMA TEAM, 2007):

- O depósito resultante é denso e homogêneo, com excelente ligação metalúrgica com o metal de base, quando comparada aos processos de deposição de revestimentos por aspersão térmica;
- O processo produz depósitos com baixa diluição (5% a 20%) e mínima distorção do substrato, com baixo aporte de calor e taxa de deposição;
- Grande flexibilidade de composição química de material que pode ser depositado, por que permite a mistura de pós com composições químicas diversas;
- Revestimentos com 0,6 a 6 mm de espessura podem ser depositados rapidamente em um único passe;
- Apesar das características positivas apresentadas o equipamento utilizado para o processo PTA-P é de custo elevado quando comparado

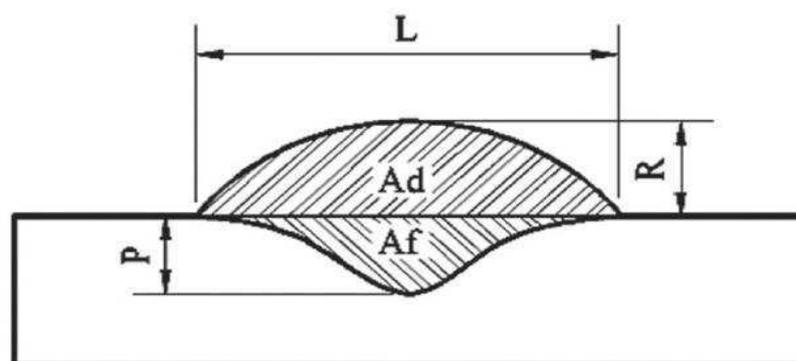
a outros processos de soldagem e necessitando de acessórios especiais caso as superfícies a serem revestidas não sejam planas ou cilíndricas.

3.4 Diluição

Na soldagem por fusão, a quantidade de material de base que se mistura com o material de adição é chamada de diluição. Na maioria das aplicações em aços de baixo carbono o efeito da diluição tem pouca importância no que diz respeito ao comportamento da junta em serviço, Entretanto, nos processos de deposição para revestimento é necessário obter a mínima diluição possível, para garantir uma perfeita ligação metalúrgica, para que o revestimento permaneça com as propriedades da liga a ser depositada.

A elevada concentração de energia por unidade de área imposta ao substrato pelo processo PTA possibilita a obtenção de revestimentos com baixa distorção e diluição da ordem de 5 a 20% (DAVIS, 1993), tradicionalmente calculado através do perfil geométrico do cordão de solda, Figura 17, pelo método das áreas, de acordo com a equação 1.

Figura 17 - Perfil geométrico dos cordões de solda.



Fonte: (PESSOA, 2010)

$$D = \frac{Af}{(Ad + Af)} \times 100 (\%)$$

Equação 1

Onde: Ad – Área depositada do cordao (Figura 17)

Af – Área fundida do metal de base (Figura 17)

3.4 Energia de Soldagem

Na soldagem a arco elétrico, a Energia de soldagem (H) é o calor necessário para fundir os metais de base e de adição gerado pelo arco elétrico. A energia de soldagem é calculada através da equação 2 (INFOSOLDA,1997).

$$H = \eta \frac{VI}{1000 \times v_s} \times 60$$

Equação (2)

Onde: V– Tensão, V_s - velocidade de soldagem; I – Corrente de Soldagem;
 η - eficiência térmica

A energia elétrica produzida pelo arco deve ser corrigida para a energia térmica que efetivamente foi introduzida na peça. A fração de energia térmica perdida é função das particularidades de cada processo de soldagem. Por isso, para corrigir a energia de soldagem é definido o adimensional η que é chamado eficiência térmica do processo de soldagem (INFOSOLDA,1997).

3.5.1 Rendimento Térmico

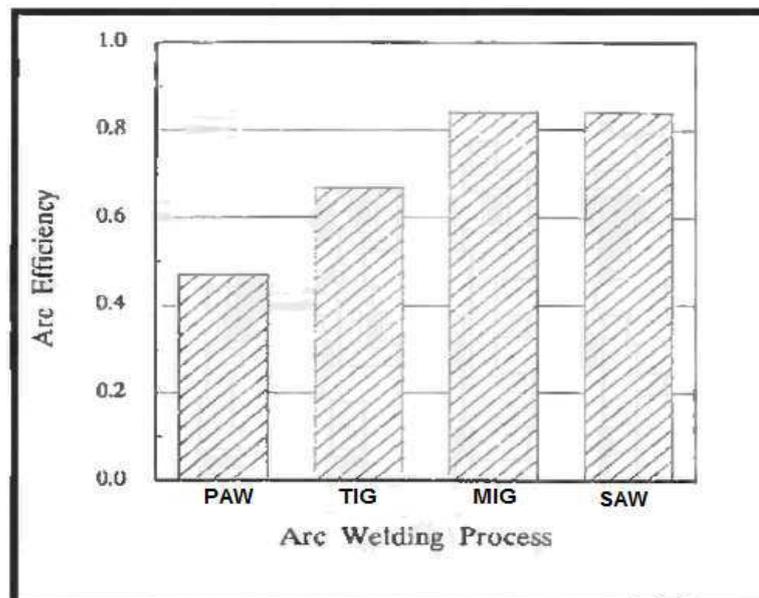
O rendimento térmico de um processo de soldagem (η_t) é a razão entre o calor transferido para o material soldado (Q_{imp}) e a energia elétrica fornecida pela fonte de soldagem (E) (Reis et al., 2011).

Conforme estudo de Schwedersky e Dutra (2011), o rendimento térmico do processo de soldagem MIG/MAG (Metal Inert Gás/ Metal Activo Gás) não é um parâmetro fixo, sendo alterado conforme o modo de transferência metálica. Os autores afirmam que a transferência metálica no modo curto-circuito foi a

que obteve o melhor rendimento (85%), seguido do modo corrente pulsada (77%) e do modo goticular (69%). Os autores atribuem o melhor rendimento térmico do curto-circuito pelo fato da transferência de calor ser mais eficiente, uma vez que, durante o curto-circuito há o contato da gota fundida na ponta do arame com a poça de fusão. O valor de rendimento térmico para o processo MIG/MAG de 85% é encontrado também no trabalho de Fuerschbach (1991) apud Reis et. al (2011).

Como a energia de soldagem depende do processo utilizado, os processos que utilizam eletrodo consumível como no caso do processo MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas) apresentam maiores rendimentos térmicos do que os processos que utilizam eletrodos não consumíveis, conforme apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Rendimento térmico do arco para os processos de soldagem PAW, TIG, MIG e SAW.



Fonte: (DuPont et al, 1995).

Oliveira (2001) cita a explicação sugerida por DuPont et al (1995), onde informam que, para o menor rendimento apresentado pelo plasma em relação a MIG/MAG, na Figura 18 se deve ao calor retirado do arco através dos bocal constritor e sistema de refrigeração sempre presentes no processo plasma.

O trabalho de Schwedersky e Dutra (2011) apresenta alguns valores de rendimentos obtidos na literatura para o rendimento térmico do processo Plasma, conforme valores abaixo.

- $\eta = 46\% \pm 3\%$ - DuPont e Marder (2011);
- $\eta = 60\%$ - Fuerschbach e Knorovsky (1995);
- $\eta = 75\%$ - Kusch, Hälsig e Thurner (1991).

3.5 Corrosão

Com o crescente desenvolvimento mundial da produção de petróleo e gás, em reservas marítimas, as indústrias de exploração de petróleo registram a ocorrência de diversos tipos de corrosão em tubulações e equipamentos empregados na extração de petróleo e gás, quando expostos a meio contendo íons de cloreto.

Considerando que a corrosão em meio aquoso, é a principal causa de deterioração de equipamentos e instalações industriais, cerca de 80% dos casos de deterioração por corrosão são de natureza eletroquímica, o que explica a importância e o interesse das pesquisas no estudo da corrosão. O grau de nocividade da corrosão é definida pela avaliação da sua forma, intensidade e extensão da área atingida, sendo a forma de corrosão por pite a mais severa (MARIANO et al., 2006).

A corrosão é conceituada como deterioração de um material, comumente metálico, por reações de natureza essencialmente química ou eletroquímica, na qual os elétrons são cedidos em determinada região e recebidos em outra. De maneira simplificada, este processo subdividi-se em três etapas: processo anódico (passagem de íons para a solução), deslocamento de elétrons e íons (transferência dos elétrons das regiões anódicas para as catódicas pelo circuito metálico e uma difusão de ânions e cátions na solução), e processo catódico (recepção dos elétrons pelos íons ou moléculas da solução) (GENTIL, 2007).

A corrosão atinge os materiais metálicos afetando suas qualidades essenciais, tais como resistência mecânica, elasticidade e ductilidade. Os

fenômenos de corrosão de metais englobam vários mecanismos que podem ser descritos resumidamente em quatro grupos: corrosão em meios aquosos (90%), oxidação e corrosão à quente (8%), corrosão em meios orgânicos (1,8%) e corrosão por metais líquidos (0,2%) (HOCHMAN; STAEHLE, 1969 apud LIMA, 2011).

3.5.1 Formas de corrosão

Conforme Gentil (2007), existem diferentes formas de corrosão e suas respectivas características:

- a. Uniforme:** a corrosão se processa em toda a extensão da superfície, ocorrendo perda uniforme de espessura.
- b. Por placas:** a corrosão se localiza em regiões da superfície metálica e não em toda sua extensão, formando placas com escavações.
- c. Alveolar:** a corrosão se processa na superfície metálica produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos apresentando fundo arredondado profundidade geralmente menor que o seu diâmetro.
- d. Puntiforme ou por pite:** a corrosão se processa em pontos ou em pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo pites, que são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior do que o seu diâmetro.
- e. Intergranular:** a corrosão se processa entre os grãos de rede cristalina do material metálico, o qual perde suas propriedades mecânicas e pode fraturar quando solicitado por esforços mecânicos, tendo-se então a corrosão sob tensão fraturante (CTF).
- f. Intragranular:** a corrosão se processa nos grãos da rede cristalina do material metálico, o qual, perdendo suas propriedades mecânicas, poderá fraturar à menor solicitação mecânica, tendo-se também corrosão sob tensão fraturante.
- g. Filiforme:** a corrosão se processa sob a forma de finos filamentos, mas não profundos, que se propagam em diferentes direções e que não se ultrapassam, pois admite-se que o produto de corrosão, em estado coloidal, apresenta carga positiva, daí a repulsão.

h. Esfoliação: a corrosão se processa de forma paralela à superfície metálica. Ocorre em chapas ou componentes extrudados que tiveram seus grãos alongados e achatados, criando condições para que inclusões ou segregações, presente no material, sejam transformadas, devido ao trabalho mecânico, em plaquetas alongadas.

i. Corrosão gráfitica: a corrosão se processa no ferro fundido cinzento em temperatura ambiente e o ferro metálico é convertido em produto de corrosão, restando a grafite intacta.

O processo de corrosão em ambiente marítimo de águas profundas e ultraprofundas é caracterizado por baixas temperaturas, alta concentração de cloreto, baixa quantidade de oxigênio, presença de CO_2 e H_2S , microorganismos e alta concentração de sais dissolvidos. Entre os tipos de corrosão, a formação de pites é muito comum em água do mar e a mais difícil de controlar (ANSELMO et al., 2006).

Vários metais sofrem corrosão por pites quando dispostos em soluções com alta concentração de cloretos, dentre os quais, estão incluídos aços inoxidáveis, ferro, níquel, cobre, magnésio, zircônio, estanho, cádmio, alumínio e suas ligas. Determinados metais são resistentes ao pite induzido por cloretos, tais como titânio, cromo e tântalo, porém, não são imunes a ele (JOUBERT, 2008).

3.5.1.1 Corrosão por pites

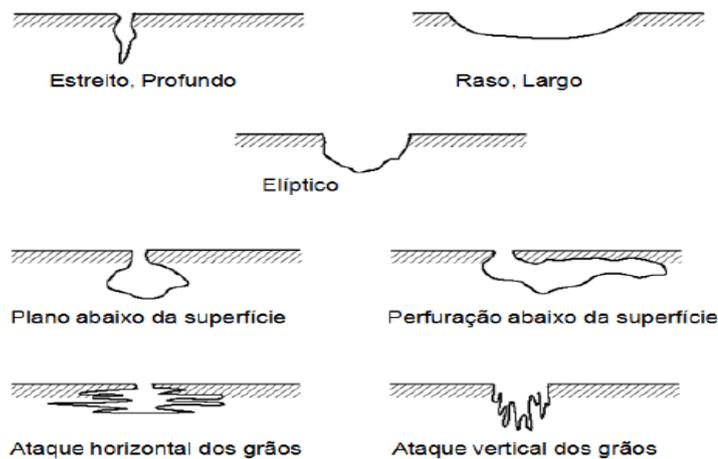
A corrosão por pites é entendida como um tipo de ataque localizado, no qual a destruição é confinada a pequenas áreas, da ordem de milímetros quadrados ou menos, e resulta em pequenos furos que penetram no metal, no entanto as outras partes da superfície permanecem passivas. O surgimento do pite está relacionado à presença de certos ânions agressivos ao meio. Um mesmo metal pode apresentar diferentes potenciais de pite em diferentes ânions, mas geralmente o íon cloreto é o mais agressivo de todos, visto que ele exibe o mais baixo potencial de pite e é um dos mais abundantes na natureza (LIMA, 2006).

Em soluções nas quais se observa um aumento na concentração de cloreto, o pite é caracterizado por um potencial mínimo, chamado potencial de

pite. Abaixo desse potencial, o metal permanece passivo e, acima dele, o pite é observado, sendo este um critério usado para sua detecção, embora um exame detalhado da região passiva mostre que a corrente de passivação é mais ruidosa em soluções de cloreto do que em soluções em que este íon esteja ausente. Os pites nos aços são bastante afastados entre si e a maior parte da superfície é passiva. No entanto, o pite possui velocidade de propagação muito rápida (LIPPOLD, 1994; JOUBERT, 2008).

Conforme Gemelli (2001), a morfologia dos pites pode variar, conforme apresentado na Figura 19 s tipos mais frequentes de pites são: profundos (estreto e profundo), oclusos (plano ou perfurações abaixo da superfície) e hemisféricos (rasgo e largo).

Figura 19 - Tipos comuns de pites.



Fonte: American Society for Testing and Materials - ASTM, 2005 apud GUILHERME, 2011.

3.5.2 Técnicas para avaliar a resistência à corrosão

3.5.2.1 Técnicas eletroquímicas

As técnicas eletroquímicas são as mais comuns utilizadas na determinação da taxa de corrosão quando um material é exposto a um meio agressivo. Permitem determinar, de forma rápida, a taxa de corrosão por meio da técnica de polarização ou varredura linear de potencial. Estes, consistem

em submeter a interface eletrodo/solução a valores crescentes de sobrepotencial para obtenção de curvas de densidade de corrente (I) vs. potencial (E) em condições de equilíbrio estacionário. As curvas de polarização obtidas são usadas na determinação da corrente e do potencial de corrosão mediante o uso da equação de Tafel (OLIVEIRA; BERTAZZOLI, 2010).

3.5.2.1.1 Resistência à Polarização Linear

A polarização pode ser conceituada como a variação do potencial de equilíbrio estabelecido por um metal devido a reações que ocorrem em sua superfície, como a formação de produtos de corrosão.

A diferença entre o potencial obtido após a polarização e o potencial de equilíbrio, é designada como sobretensão. Se o potencial obtido for menor que o potencial de equilíbrio considera-se a polarização catódica, se for maior, a polarização é dita anódica. A determinação da susceptibilidade de um metal à corrosão por pite é determinada através do potencial de pite por meio de curvas de polarização anódica (WOLYNEC, 2003).

As técnicas de polarização que empregam correntes contínuas envolvem abordagens potenciostáticas e potenciodinâmicas. Na primeira, são aplicados potenciais anódicos crescentes discretos, e a cada potencial registra-se o diminuição de corrente com o tempo. Na abordagem potenciodinâmica, comumente mais utilizada, a corrente necessária para manter o metal (eletrodo de trabalho) em cada potencial aplicado constantemente é determinada, e os dados potencial (E) versus corrente (i) são plotados em um gráfico (POORQASEMI et al., 2009).

O método de resistência à polarização linear envolve a perturbação do eletrodo de trabalho com potenciais de magnitude da ordem de $\pm 5 - 10\text{mV}$ (Frankel, 2008) e, portanto, não causam grandes mudanças na superfície do eletrodo. Neste método, a análise potencial, $\Delta E(t)$, é definida em relação ao potencial de corrosão ($\Delta E = E - E_{\text{corr}}$), o qual é aplicado a uma amostra de metal. As resultantes das correntes são registrados. A resistência de polarização, R_p , de um eletrodo de corrosão é definida a partir da Equação 3, (ASTM G59, 2009).

$$R_p = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial i} \right)_{i=0, dE/dt \rightarrow 0}$$

Equação (3)

O termo i_{corr} é a densidade de corrente de corrosão, que pode ser relacionado com a resistência à polarização pelo coeficiente Stern-Geary (B), como mostrado na Equação 4. As unidades utilizadas para a R_p , i e B são ohm.cm^2 , $\text{m-}\mu\text{A/cm}^2$ e V, respectivamente (ASTM G59, 2009).

$$i_{corr} = 10^6 \frac{B}{R_p}$$

Equação (4)

A avaliação da taxa de corrosão (TC) pelo método de resistência à polarização linear requer o conhecimento dos coeficientes de Tafel catódico (b_c) e anódico (b_a), que podem ter seus valores atribuídos ou calculados (em V). A TC pode então ser calculada de acordo com a relação de Stern-Geary Equação 5 (Frankel, 2008).

$$B = \frac{b_a b_c}{2,303(b_a + b_c)}$$

Equação (5)

A taxa de corrosão (TC) pode ser obtida em mm/ano, pela Equação 6, em que E_w é o equivalente em peso da espécie corroída em gramas e ρ a densidade do material corroído, em g/cm^2 (ASTM G59, 2009).

$$TC = 3,27 \times 10^{-3} \frac{i_{corr} E_w}{\rho}$$

Equação (6)

Apesar da resistência à polarização ser bastante utilizada no cálculo da taxa de corrosão, ela não fornece valores exatos para esse parâmetro. Isso ocorre devido ao fato dessa técnica não fornecer diretamente os coeficientes de Tafel, devendo os mesmos ser atribuídos ou calculados por outras técnicas.

Entretanto, podem ser obtidas outras informações valiosas sobre o processo de corrosão permitindo o estudo sobre efeitos da utilização de inibidores de corrosão, mudanças de pH, entre outras (MANSFELD, 2005).

3.5.2.1.2 Técnica de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

A técnica de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) fornece uma visão completa e detalhada das características elétricas da interface eletrodo/solução, e estas informações são de grande interesse na eletroquímica aplicada ou básica. A técnica de espectroscopia de impedância é uma técnica de caracterização elétrica, que permite estudar o comportamento geral de um sistema quando um número grande de processos intercorrelacionados ocorre em diferentes velocidades (CARVALHO,2006).

3.6 Planejamento Experimental

Com a evolução tecnológica dos vários segmentos industriais, as empresas têm buscado cada vez mais a diminuição de custos, defeitos e variabilidade em seus processos. Para isto, a aplicação de métodos estatísticos nos processos de manufatura e de serviços tem se constituído em fator importante e diferencial entre as empresas.

Os métodos estatísticos são usados para análise de dados, além de ser utilizados para planejamento de experimentos, os quais são coletados. Por mais elaborada a análise que se faça, a falta de planejamento pode acarretar em grandes prejuízos, e o pesquisador pode perder muito tempo para que se perceba que deveria ter planejado os seus experimentos de maneira adequada.

O planejamento de experimentos é a metodologia mais apropriada para estudar diversos fatores de processo e a complexidade de suas interações, de maneira a aumentar a possibilidade de solucionar problemas, através de análises estatísticas. Essa metodologia é considerada poderosa para melhorar

a qualidade e a produtividade, tendo sido, cada vez mais utilizada pelas indústrias brasileiras (SILVA e SILVA, 2008; LIMA et al., 2011).

Conforme Rosa et al. (2009), Robin et al. (2010), Souza et al. (2010) a metodologia do planejamento experimental é muito utilizada para se determinar, durante a fase de experimentação, quais dados e em quais condições devem ser coletados. Para Neto et al. (2007), o emprego deste método na sua forma tradicional, com matrizes completas 2^k , onde k representa a quantidade de fatores investigados e uma réplica completa requer $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ observações, implica em um grande número de experimentos, o que pode tornar inviável o estudo, devido aos altos custos com ensaios.

A aplicação de planejamento de experimentos também pode ser realizada empregando matrizes fracionadas, proporcionando diminuição significativa na quantidade de experimentos. A aplicação da matriz fracionada implica, todavia, em prejuízo à análise estatística, uma vez que se confundem os efeitos dos fatores com os das interações (BENYOUNIS ; OLABI, 2008).

De acordo com Montgomery e Runger (2009), A ANOVA é um método estatístico utilizado para interpretar os dados experimentais nas tomadas de decisões e para testar estatisticamente as médias dos resultados, em suas diferentes condições. Com esse método, podem-se comparar três ou mais fatores e suas interações, fazendo uso do teste F, para comprovar quais são os fatores realmente significantes no processo, como também obter o valor de R^2 (coeficiente de determinação) (ROSA et al., 2009; CORREIA e CARDOZA, 2011).

O coeficiente de determinação ou explicação R^2 quantifica a qualidade do ajustamento, pois fornece uma medida da proporção da variação explicada pela equação de regressão em relação à variação total das respostas. Varia de 0 a 100% (RODRIGUES & IEMMA, 2005).

O teste F apresenta a razão entre o F calculado e o F tabelado, sempre que esta relação for maior que um a regressão é estatisticamente significativa havendo relação entre as variáveis independentes e dependentes. Para que uma regressão seja não apenas estatisticamente significativa, mas também útil para fins preditivos, o valor da razão deve ser no mínimo maior que quatro (BARROS NETO et al., 1996).

4 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a especificação e a descrição dos materiais e equipamentos, bem como a metodologia experimental empregada neste trabalho.

4.1 Materiais

4.1.1 Metal de Base

O material utilizado como metal de base neste trabalho foi fornecido pela USIMINAS na forma de chapa plana de aço ARBL de especificação API 5L-X70 com espessura de 19 mm, 1000 mm de comprimento e 1000 mm de largura, conforme imagem ilustrativa na Figura 20.

Figura 20 - Chapa de aço ARBL API 5L X70.



Fonte: Autor

A Tabela 2 apresenta a composição química (% em peso) aço ARBL API 5L X70.

Tabela 2 - Composição química (% em peso) do metal de base utilizado.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
API 5L X70	0,19	0,24	0,7	0,018	0,018	0,064	0,008	0,07

Fonte: USIMINAS

4.1.2 Metal de Adição

Foi utilizado como metal de adição para o processo de Soldagem por plasma com arco transferido, PTA, a liga de Níquel Inconel 625 na forma de pó atomizado, apresentando faixa de granulométrica de 60 a 63 μm , cuja composição química é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química (% em peso) do metal de adição na forma de Pó.

	Cr	C	Mo	Nb	Fe	Ni
ER NiCrMo -3	21	0,05	9,2	3,5	3	balance

Fonte: DURMAT[®]

Já no processo de Soldagem Metal Inerte Gás (MIG), o metal de adição utilizado foi a liga de Níquel Inconel 625, ER NiCrMo-3, na forma de arame maciço com 1,2 mm fornecido em bobina de 15 Kg, cuja composição química é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição química (% em peso) do metal de adição na forma de arame.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Ti	Fe	Nb+ Ta
ER NiCrMo -3	0,1	0,5	0,5	0,020	0,015	20,0	8,0	58	0,4	0,5	0,4	3,8	3,15 - 4,15
						23,0	10,0					2	

Fonte: HAYNES Wire Company

4.1.3 Gases

Foi utilizado para o Processo de Soldagem a Plasma Arco Transferido, PTA, o gás argônio puro para os três fluxos de gases (Gás de proteção, Gás de plasma e Gás de arraste). Já para o Processo de Soldagem MIG foi utilizado como gás de proteção a mistura de gasosa (75% de argônio e 25% de Hélio).

4.2 Equipamentos

4.2.1 Equipamento de Corte

Para obtenção dos corpos de prova, as chapas foram cortadas utilizando-se maçarico de corte oxiacetilênico.

4.2.2 Equipamento de Soldagem

O equipamento de soldagem utilizado foi o modelo DIGI Plus A7 800 fabricado pela IMC Soldagem, contendo os seguintes acessórios: Fonte do tipo corrente contínua e tensão constante com capacidade de corrente máxima de 800 A, sistema de aquisição de dados para o monitoramento da corrente e da tensão durante a soldagem; Tartilope para deslocamento linear da tocha; Tocha Plasma Pó; Tocha MIG/MAG; Módulo plasma; Alimentador de Pó, conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Equipamento de Soldagem.



Fonte: Autor

4.2.3 Equipamentos para Metalografia

Os equipamentos, Figura 22, utilizados na análise metalográfica dos corpos de prova revestidos foram:

- Lixadeira e politriz

Figura 22 - Lixadeira Manual e Politriz



Fonte: Autor

4.2.4 Microdurômetro

Para realização do ensaio de microdureza utilizou-se o microdurômetro digital FM-700 Future Tech apresentado na Figura 23, com escala Vickers.

Figura 23 - Microdurômetro digital FM-700 Future Tech.



Fonte: Autor

4.2.5 Microscópio Ótico

Foi utilizado o microscópio ótico OLYMPUS BX 51M, Figura 24, interligado a um computador que possui o programa que fornece as imagens microestruturais.

Figura 24 - Microscópio ótico OLYMPUS BX 51M.



Fonte: Autor

4.2.6 Equipamento para Ensaio de Corrosão

Para o ensaio de corrosão foram utilizados o Equipamento Potenciostato/Galvanostato PG STATE30 da Autolab, Figura 24, O equipamento funciona com auxílio de uma placa de interface PCI instalada em um computador, que possui o software, NOVA 1.9, para a aquisição de dados.

Figura 25 - Potenciostato/Galvanostato PG STATE30 da Autolab.



Fonte: Autor

4.3 Metodologia

4.3.1 Preparação dos corpos de prova para soldagem

A preparação dos corpos de prova consistiu inicialmente em corte da chapa de Aço ARBL API XL X70 através do processo Oxi-acetileno, para obter os corpos de prova com dimensões (145 x 60 x 19) mm. Após a obtenção dos corpos de provas, eles foram lixadas com disco de lixa e escova rotativa de aço para retirar eventuais resíduos de óxidos, para em seguida ser realizada a deposição do cordão de solda.

4.3.2 Deposição dos Revestimentos

Antes da realização dos depósitos de revestimento pelo processo de soldagem por plasma com arco transferido, PTA, foram realizados depósitos pelo processo de Metal Inert Gás, MIG, o qual foi utilizado um planejamento experimental fatorial em dois níveis com 3 repetições do ponto central, conforme apresentado na Tabela 5 os valores dos níveis. Os valores dos parâmetros utilizados neste planejamento experimental foram de acordo com os estudos de Pontes (2012).

Tabela 5 - Níveis reais e codificados dos fatores em estudo: U (tensão de referência) , Va (velocidade de alimentação do arame) e Vs (velocidade de soldagem)

Variáveis de entrada	Níveis		
	- 1	0	+ 1
U (V)	26	29	32
Va (m/min)	6	7,5	9
Vs (cm/min)	20	25	30

Fonte: Autor

A Tabela 6 apresenta, de acordo com as regras do planejamento fatorial, a sequência das nove combinações possíveis das variáveis de entrada com o ponto central realizado três vezes, resultando em onze experimentos realizados em uma ordem aleatória (OA) para os cordões depositados pelo processo MIG. A réplica do ponto central permite o cálculo do erro experimental e significância dos efeitos. A sequência aleatória dos experimentos permite a aplicação de testes estatísticos de significância e a construção de intervalos de confiança.

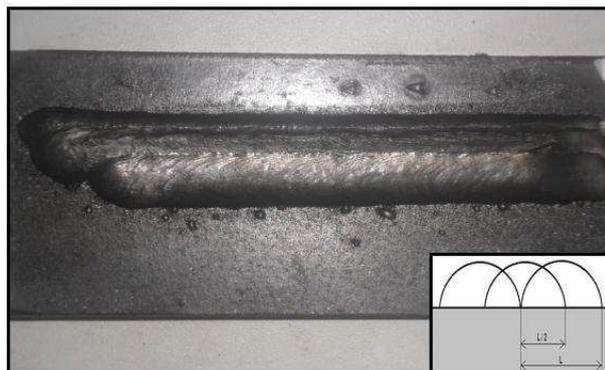
Tabela 6 - Matriz de planejamento experimental 2^3 das variáveis de entrada no processo MIG.

EXPERIMENTO	OA	U (V)	Vs	Va (mm)
1	11	26 (-1)	20 (-1)	6 (-1)
2	10	32 (+1)	20 (-1)	6 (-1)
3	4	26 (-1)	30 (+1)	6 (-1)
4	7	32 (+1)	30 (+1)	6(-1)
5	3	26 (-1)	20 (-1)	9 (+1)
6	8	32 (+1)	20 (-1)	9 (+1)
7	6	26 (-1)	30 (+1)	9 (+1)
8	1	32 (+1)	30 (+1)	9 (+1)
9	2	29 (0)	25 (0)	7,5 (0)
10	5	29 (0)	25 (0)	7,5 (0)
11	9	29 (0)	25 (0)	7,5 (0)

Fonte: Autor

A deposição foi feita com três camadas de revestimentos, Figura 26, utilizando uma sobreposição de $1/2$ de L em cada corpo de prova utilizando uma temperatura de interpasse de 100°C .

Figura 26 - Revestimento MIG com três passes com sobre posição $1/2$.



Fonte: Autor

Para deposição das camadas de revestimentos alguns parâmetros de soldagem foram mantidos constantes, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros mantidos constantes pelo Processo MIG.

Sentido de Soldagem	Empurrando
Posição de Soldagem	Plana
Polaridade	Reversa (CC+)
Gás de Proteção	75% Argônio + 25% Hélio
Vazão do Gás	25 L/min
DBCP	20 mm
Ângulo de ataque	75°

Fonte: Autor

Após a deposição dos revestimentos pelo processo MIG, foram calculados as energias de soldagem para cada passe através da equação 7, utilizando os valores de corrente obtidos para cada depósitos, juntamente com parâmetros utilizados na Tabela 6, e adotando um rendimento térmico (η) de 0,87 para o processo MIG.

$$H = \eta \frac{VI}{1000 \times v_s} \times 60$$

Equação (7)

onde:

H=Energia de soldagem;

η = rendimento térmico;

V = tensão de soldagem (V);

I = corrente de soldagem (A);

v_s = velocidade de soldagem(cm/min).

A Tabela 8 apresenta os valores de Energia de soldagem (H) obtidos pelo processo de MIG, com os respectivos valores de corrente de soldagem.

Tabela 8 - Níveis de Energia obtida pelo Processo MIG.

EXPERIMENTO	I(A)	H (KJ/cm)
1	182,75	12,40
2	203,09	16,96
3	225,39	15,29
4	228,05	18,99
5	184,01	8,34
6	195,54	10,89
7	221,51	10,02
8	238,79	13,30
9	205,98	12,47
10	206,04	12,48
11	206,02	12,47

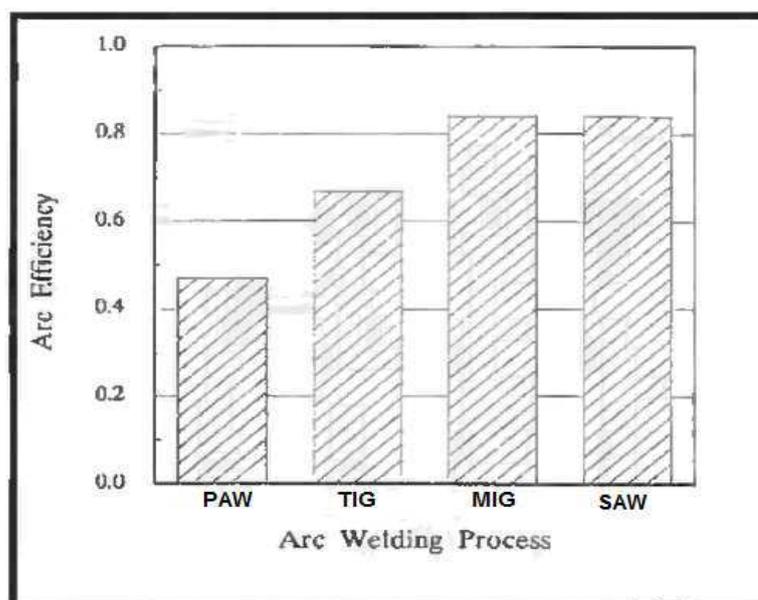
Fonte: Autor

Para deposição por plasma com arco transferido, PTA, utilizou-se os valores da corrente de soldagem 228 A e 184 A, o qual proporcionou o maior e o menor resultado da energia de soldagem, ou seja, 18,99 kJ/cm e 8,34 kJ/cm, provenientes dos depósitos realizados inicialmente pelo processo de soldagem MIG (DuPont et al, 1995).

Como a energia de soldagem depende do processo utilizado, os processos que utilizam eletrodo consumível como no caso do processo MIG/MAG (metal inert gas/metal active gas) apresentam maiores rendimentos térmicos do que os processos que utilizam eletrodo não consumíveis, conforme apresentado na Figura 27.

Oliveira (2001) cita que a explicação sugerida por DuPont et al (1995) pelo menor rendimento apresentado pelo plasma em relação a MIG/MAG, se deve ao calor retirado do arco através dos bocal constritor e sistema de refrigeração sempre presentes no processo plasma.

Figura 27 - Rendimento térmico do arco para os processos de soldagem.



Fonte: (Adaptado de DuPont et al, 1995).

Para utilização dos níveis máximo e mínimo, 18,99 KJ/cm e 8,34 KJ/cm, de energia de soldagem obtidos na deposição por soldagem MIG nos depósitos por PTA, foi necessário calcular os níveis de velocidade de soldagem através da equação 7, utilizando as corrente de soldagem, 184 A e 228 A, que proporcionou o maior e o menor, 18,99 KJ/cm e 8,34 KJ/cm, energia de soldagem, adotando um rendimento térmico de 0,43 (DuPont et al, 1995). Após isso, foi estabelecido um novo planejamento experimental fatorial, para deposição com o processo PTA, em dois níveis com 3 repetições do ponto central, conforme apresentado na Tabela 9 os valores dos níveis.

Tabela 9 - Níveis reais e codificados dos fatores em estudo.

Variáveis de entrada	Níveis		
	- 1	0	+ 1
I (A)	184	206	228
Vs (cm/min)	10	13	16
Tx (g/min)	28,8	30,4	32

Fonte: Autor

Onde I é a corrente de referência, Vs é a velocidade de soldagem e Tx é a taxa de alimentação do pó.

A Tabela 10 apresenta, de acordo com as regras do planejamento fatorial, a sequência das nove combinações possíveis das variáveis de entrada com o ponto central realizado três vezes, resultando em onze experimentos realizados em uma ordem aleatória (OA). A réplica do ponto central permite o cálculo do erro experimental e significância dos efeitos. A sequência aleatória dos experimentos permite a aplicação de testes estatísticos de significância e a construção de intervalos de confiança.

Tabela 10 - Matriz de planejamento experimental 2^3 mais 3 ponto central.

EXPERIMENTO	OA	I (A)	Vs (cm/min)	Tx(g/min)
1	2	184 (-1)	10 (-1)	28 (-1)
2	3	228 (+1)	10 (-1)	28 (-1)
3	4	184 (-1)	16 (+1)	28 (-1)
4	1	228 (+1)	16 (+1)	28 (-1)
5	9	184 (-1)	10(-1)	32 (+1)
6	11	228 (+1)	10 (-1)	32 (+1)
7	10	184 (-1)	16 (+1)	32 (+1)
8	6	228 (+1)	16 (+1)	32 (+1)
9	8	206 (0)	13 (0)	29,5 (0)
10	7	206 (0)	13 (0)	29,5 (0)
11	5	206 (0)	13 (0)	29,5 (0)

Fonte: Autor

A deposição foi feita com três camadas de revestimentos utilizando uma sobreposição de $1/2$ de L em cada corpo de prova conforme apresentado na Figura 28, utilizando uma temperatura de interpasse de 100°C .

Figura 28 - Revestimento Plasma Pó com três passes com sobre posição $1/2$.



Fonte: Autor

Para deposição das camadas de revestimentos alguns parâmetros de soldagem foram mantidos constantes, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros mantidos constantes pelo Processo PTA

Recuo do Eletrodo	1 mm
Diâmetro do Bico Constritor	3,10 mm
Polaridade	Reversa (CC-)
Vazão do Gás de Proteção	10 L/min
Vazão do Gás de Plasma	2,2 L/min
Vazão do Gás de Arraste	3 L/min
DBP	20 mm
Ângulo de ataque	90°

Fonte: Autor

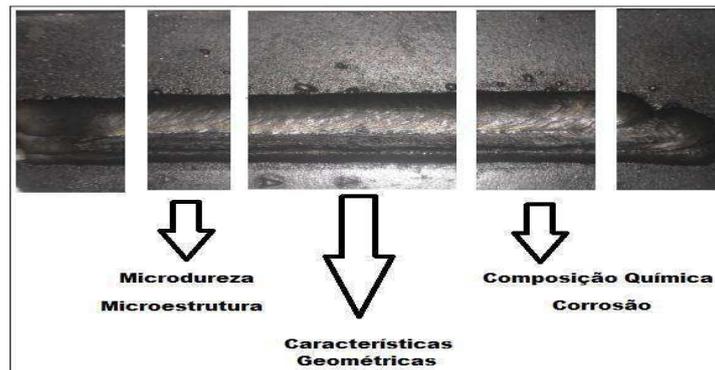
O objetivo da utilização dos valores da corrente de soldagem obtidos pelo processo MIG baseado nos valores máximo e mínimo de energia de soldagem, foi verificar de forma comparativa o efeito dos depósitos através do processo de soldagem a arco Plasma Transferido com relação aos realizados com arame maciço pelo processo MIG.

4.3.3 Caracterização

4.3.3.1 Preparação das amostras

Os corpos de prova com os revestimentos soldados obtidos tanto pelo processo de soldagem por plasma com arco transferido, PTA, quanto pelo processo MIG, foram avaliados superficialmente e em seguida foram seccionados no sentido transversal ao cordão de solda conforme apresentado na Figura 29, para análise das características geométrica (largura, reforço, penetração e diluição), metalografia, e para análise de composição química e ensaio de corrosão.

Figura 29 - Retirada das amostras nas chapas para a realização dos ensaios.

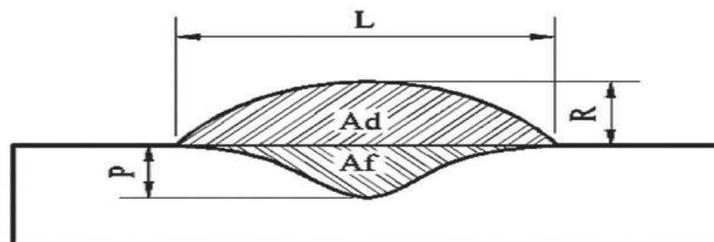


Fonte: Autor

4.3.3.2 Caracterização geométrica e cálculo da diluição

As amostras obtidas, após corte transversal, foram avaliadas quanto as características geométricas (largura, reforço e penetração e razão R/L) utilizando um paquímetro para as medições. Foram realizadas três medições e feita a média. Já para a medição da penetração e cálculo da diluição foi utilizado o software Image tool. A Figura 30 mostra as regiões correspondentes à largura (L), do reforço (R) e da penetração (P).

Figura 30 - Medição das características geométricas e da área do cordão de solda.



Fonte: (PESSOA, 2010)

onde:

L = largura;

R = reforço;

P = penetração;

A_f = zona fundida;

A_d = metal depositado.

A diluição é o percentual do metal de base que se dissolve junto ao metal de adição formando a composição química do metal de solda e pode ser medida em função da área do metal de base fundida, conforme a Figura 13. Em função desse comportamento a diluição é uma das mais importantes das variáveis que deve sempre ser considerada na soldagem de revestimento. Utilizando-se a equação 2 pode-se quantificar a diluição do depósito.

$$D (\%) = \frac{A_f}{A_f + A_d} \times 100$$

Equação 8.

4.3.3.3 Preparação Metalográfica

Os corpos de prova foram submetidos à preparação metalográfica, o qual foram lixados com lixas com (granulação de 80, 100, 180, 220, 320, 400, 600, 800 e 1000 até 1200 μm), em seguida os mesmos foram submetidos à polimento em disco de pano com alumina 4 (1 μm), 3 (0,3 μm) e 2 (0,05 μm) e, por fim, foram atacados quimicamente com Nital 2,0 % durante um período de 10 segundos para realização da análise metalográfica por microscopia ótica.

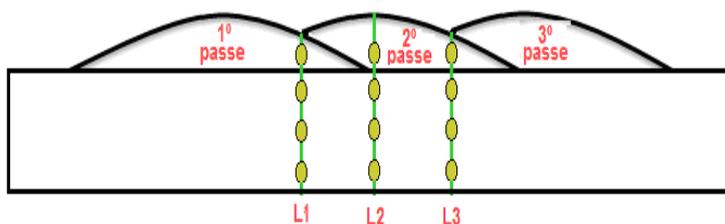
4.3.3.4 Ensaio de Microdureza

As amostras, depois de polidas, foram analisadas por ensaio de microdureza Vickers, com o objetivo de mapear a variação da dureza desde a região do depósito passando pela zona termicamente afetada até o metal de base, de modo a correlacionar os valores da microdureza com o comportamento microestrutural do metal de solda, zona termicamente afetada e metal de base.

O levantamento dos perfis de microdureza vicker, consistiu de varredura em três linhas verticais, sendo traçado uma linha na seção transversal no centro dos cordões e as demais na região da sobreposição dos mesmos, em pontos do Metal de Solda (MS), Zona termicamente afetada (ZTA) e metal de base (MB), aplicando uma carga de 100 g por 15 segundos a 0,20 mm,

conforme mostra a Figura 31. Foram feitas 30 medições por linha com distâncias de 0,10 mm da linha de fusão na parte da ZTA e 0,10 mm interface no MS, em cada amostra e construídos gráficos do perfil de dureza do total de medidas.

Figura 31 - Ensaio de microdureza ao longo de linhas verticais.



Fonte: Autor

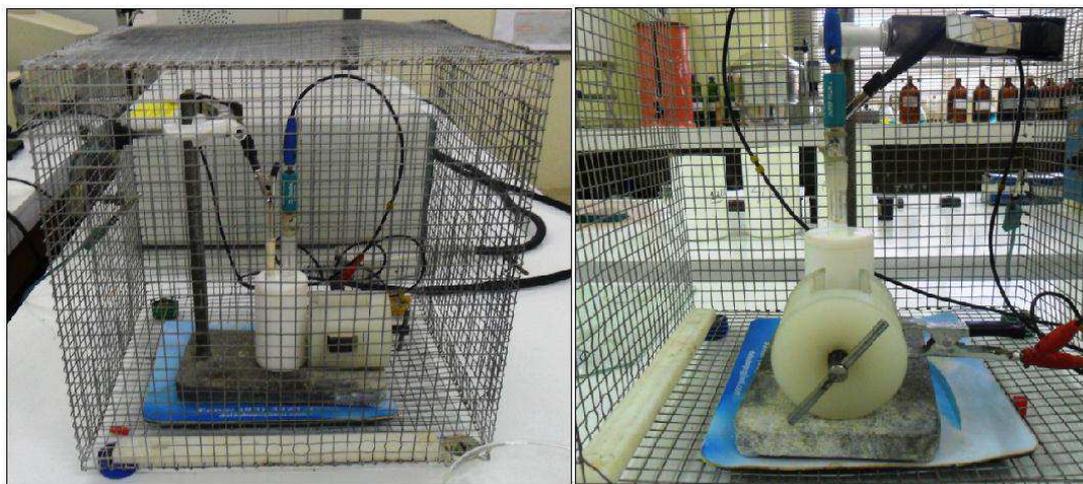
4.3.3.5 Análise de Composição Química (Teor de Ferro)

As superfícies dos revestimentos foram submetidas a análise de composição química utilizando o EDX - Energy Dispersive X-ray (Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raio X) em pontos nas seções planificadas dos revestimentos, ou seja, na região que seria submetida à análise de corrosão, para avaliar o percentual de Fe, bem como os demais elementos químicos presentes nas superfícies das amostras. Estes testes foram conduzidos com um colimador de diâmetro 3 mm e atmosfera à vácuo (30 Pa).

4.3.3.6 Análise de corrosão

As amostras foram submetidas à análise de resistência à corrosão, por polarização potenciodinâmica linear, através de uma célula eletroquímica no interior de uma Gaiola de Faraday, conforme apresentado na Figura 32. Utilizou-se 60 ml de solução de NaCl 1M como meio corrosivo na célula, utilizando um eletrodo de cloreto de prata (Ag/AgCl) como sendo o de referência, e como contra eletrodo utilizou-se um fio de platina em forma de espira para aumentar a superfície de contato. Os eletrodos de trabalho foram as amostras de revestimentos com ligas de níquel. As análises foram realizadas à temperatura ambiente.

Figura 32 - Célula eletroquímica e Gaiola de Faraday para análise de corrosão.



Fonte: Autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Revestimentos depositados por soldagem PTA-P

5.1.1 Avaliação dos parâmetros geométricos e diluição

A avaliação dos parâmetros geométricos foi realizada pela ferramenta de planejamento experimental e a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), onde permitiu investigar a influência das variáveis do processo e a forma de interação entre estas variáveis, bem como obter o valor das variáveis que maximizem os resultados esperados.

A matriz de planejamento fatorial 2^3 juntamente com os resultados experimentais da deposição por soldagem PTA-P com relação as variáveis dependentes: diluição (D%), reforço r(mm), largura L(mm), índice de convexidade $IC=r/L*100\%$ e profundidade P(mm) quando se faz variar as variáveis independentes: corrente de soldagem I(A), velocidade de soldagem (Vs) e a taxa de alimentação Tx (g/min) estão apresentados na tabela 12.

Tabela 12- Matriz de planejamento fatorial 2^3 e resultados obtidos por PTA-P.

Experimento	Variáveis Independentes			Variáveis dependentes				
	I(A)	Vs (cm/min)	Tx (g/min)	r (mm)	L (mm)	P (mm)	D%	IC=100*r/L (%)
1	184	10	28,8	4,83	23,8	0,7	5,65	35,27
2	228	10	28,8	4,13	28,3	1,67	15,33	29,00
3	184	16	28,8	4,40	21,4	0,6	5,02	38,51
4	228	16	28,8	3,47	22,38	1,5	14,12	30,52
5	184	10	32	5,70	29,0	0,67	5,06	30,74
6	228	10	32	4,93	32,8	1,53	14,71	27,46
7	184	16	32	4,80	22,6	0,47	4,39	33,97
8	228	16	32	4,73	23,5	1,4	13,68	26,82
9	206	13	30,4	4,45	25,3	1,0	10,59	30,21
10	206	13	30,4	4,58	25,33	1,03	10,48	30,26
11	206	13	30,4	4,52	25,33	1,01	10,61	29,55

Fonte: Autor

Com base nos resultados experimentais obtidos, foi possível ajustar os dados para obter um modelo linear que relacione as variáveis dependentes: reforço r (mm), largura L (mm), índice de convexidade $IC=r/L*100\%$, profundidade P (mm) e diluição (D%), com as variáveis independentes estudadas. Os modelos obtidos são empíricos sendo aplicáveis apenas em uma determinada região.

As equações 9, 10, 11, 12 e 13 representam os modelos estabelecidos para as variáveis dependentes, onde os coeficientes em negrito são os efeitos estatisticamente significativos ao nível de 95% de confiança.

$$r = \mathbf{4,5954} - \mathbf{0,3083} \cdot I - \mathbf{0,275} \cdot Vs + \mathbf{0,4166} \cdot Tx - 0,0583 \cdot I \cdot Vs - \mathbf{0,1000} \cdot I \cdot Tx + \mathbf{0,11} \cdot I \cdot Vs \cdot Tx$$

Equação (9)

$$L = \mathbf{26,3145} - \mathbf{1,84} \cdot I - \mathbf{1,787} \cdot Vs + \mathbf{2,082} \cdot Tx - 0,227 \cdot I \cdot Vs - 0,157 \cdot I \cdot Tx - 0,342 \cdot Vs \cdot Tx + 0,017 \cdot I \cdot Vs \cdot Tx$$

Equação (10)

$$IC = \mathbf{31,1192} - \mathbf{3,087} \cdot I + 0,916 \cdot Vs - \mathbf{1,789} \cdot Tx - 0,700 \cdot I \cdot Vs - 0,478 \cdot I \cdot Tx - 0,271 \cdot Vs \cdot Tx - 0,268 \cdot I \cdot Vs \cdot Tx$$

Equação (11)

$$P = \mathbf{1,0658} + \mathbf{0,458} \cdot I - \mathbf{0,075} \cdot Vs - 0,050 \cdot Tx - 0,008 \cdot I \cdot Tx - 0,008 \cdot Vs \cdot Tx + 0,0167 \cdot I \cdot Vs \cdot Tx$$

Equação (12)

$$D\% = \mathbf{9,780} - \mathbf{4,715} \cdot I - \mathbf{0,442} \cdot Vs - \mathbf{0,228} \cdot Tx - 0,117 \cdot I \cdot Vs - 0,02 \cdot I \cdot Tx - 0,0175 \cdot Vs \cdot Tx + 0,0275 \cdot I \cdot Vs \cdot Tx$$

Equação (13)

Onde: I = corrente de soldagem; Vs = velocidade de soldagem; Tx = taxa de alimentação e $I \cdot Vs$, $I \cdot Tx$, $Vs \cdot Tx$ e $I \cdot Vs \cdot Tx$ são as interações das variáveis.

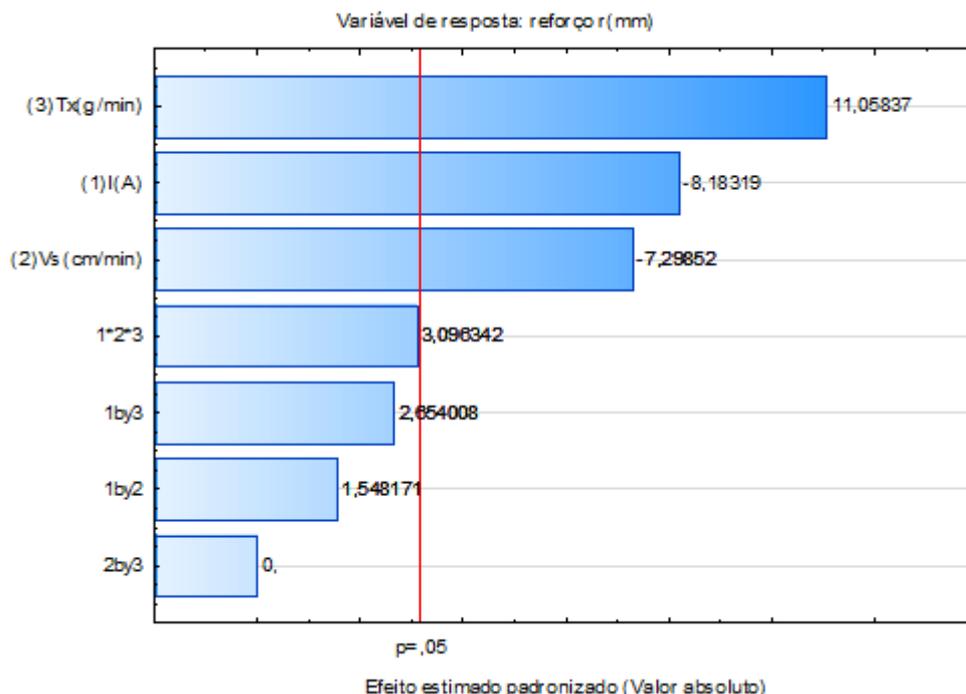
5.1.1.1 Efeitos das variáveis do processo sobre o reforço (r)

De acordo com os valores de resposta da variável reforço r (mm) apresentados Tabela 11, nota-se que houve uma variação na altura do reforço de 3,47 mm a 5,70 mm. Estando assim de acordo com a norma N-1707 (2011) da PETROBRAS, a qual recomenda uma altura líquida de 3 mm.

O Diagrama de Pareto para a variável de resposta reforço (r), Figura 33, permite determinar quais coeficientes do modelo que apresentam influência estatística representada pelas colunas, e a linha transversal às colunas correspondente ao nível de significância de 5%.

Através da Figura 33, observa-se no diagrama de Pareto que a taxa de alimentação, Tx, é o efeito mais significativo para variável de resposta reforço, estando com valor na coluna positivo, significando então que o maior valor do reforço (r) é atingido para os maiores valores da taxa de alimentação. A corrente de soldagem vem em segundo lugar como modelo de maior relevância, seguido da velocidade de soldagem.

Figura 33 - Diagrama de Pareto dos efeitos para variável reforço r (mm).

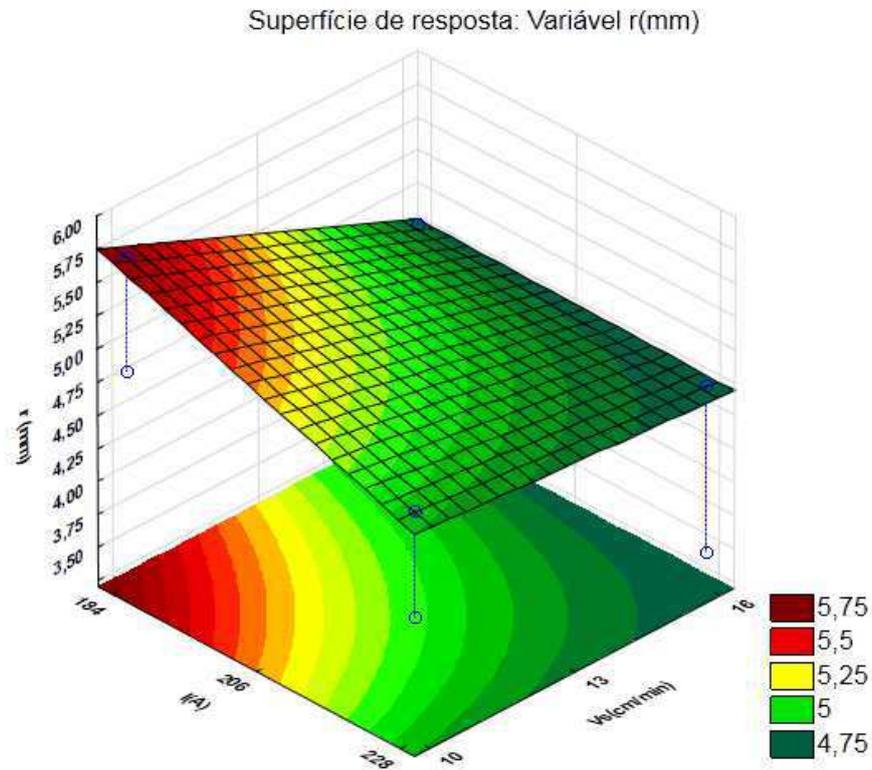


Fonte: Autor

Com base nestas informações apresentadas, a superfície de resposta foi construída mantendo-se o valor da taxa de alimentação fixa em 32 g/min, variando os valores das variáveis corrente I e da velocidade de soldagem Vs. A superfície de resposta é a descrição gráfica do modelo, o que simplifica a interpretação dos resultados.

Observa-se na Figura 34, superfície construída para o reforço r(mm), que a máxima altura do reforço 5,75 mm ocorre para valores de corrente de 184 A e velocidade de soldagem 10 cm/min. Este valor está próximo do valor experimental obtido no experimento 5 nas mesmas condições que é de 5,70 mm.

Figura 34 - Superfície de resposta do reforço sob a influência da Corrente de soldagem versus velocidade de soldagem, fixando-se a Taxa de Alimentação 28,8 g/min (-1).



Fonte: Autor

Portanto, os maiores valores encontrados foram para os experimentos com maiores taxas de alimentação, menores velocidades de soldagem e menores valores de corrente. Tais resultados estão de acordo com os encontrados por (DIAZ, 2009), o qual conseguiu aumentar o reforço quando elevou a taxa de alimentação em média 20%. Com relação a corrente de soldagem, valores menores favoreceram a maiores reforço (DIAZ, 2009). Já para as menores velocidades de soldagem, o aumento no reforço está relacionado com aumento da quantidade de pó depositado por minuto (REINALDO, 2008).

Na Tabela 13 constam os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 13 - Análise de variância para avaliação do reforço (r).

Fator	SQ	GL	MQ	F_{calculado}
Regressão	2,9706	7	0,42	37,36
Resíduo	0,0341	3	0,01	
F.Ajuste	0,0256	1	0,025606	
Erro Puro	0,0085	2	0,004233	
Total	3,0046	10		
R²	98,86%			
F_{tabelado}	8,89		F_{calc}/ F_{tab}=	4,20

Fonte: Autor

Pode-se concluir, observando os dados da Tabela 13, que o modelo apresentado na Equação 9 tem coeficiente de determinação (R^2) igual a 98,86% das variações obtidas explicado pelo modelo, equação 9, e com um valor da razão de $F_{\text{calculado}}$ por F_{tabelado} de 4,20, indicando que o modelo é estatisticamente significativo com 95% de confiança devido ao valor razão ser maior que um, e útil para fins preditivos em consequência de ser maior que quatro (Barros Neto et al., 1996).

5.1.1.2 Efeitos das variáveis do processo sobre a largura (L)

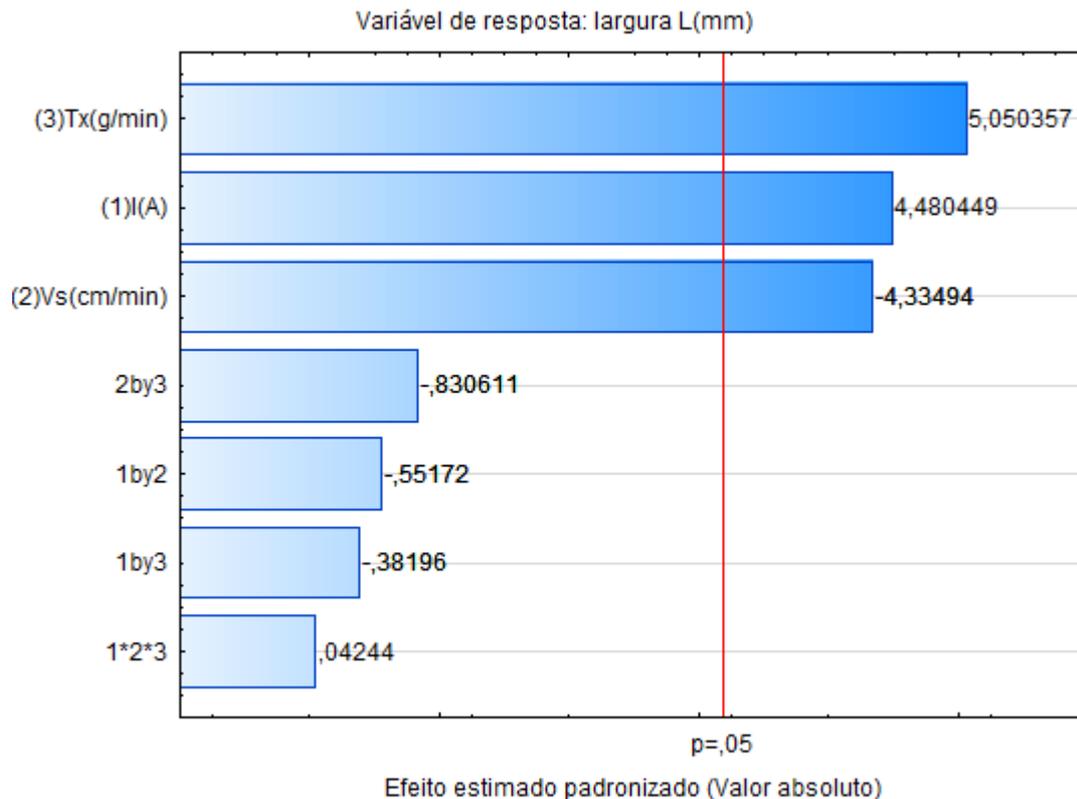
Conforme resultados obtidos indicados na Tabela 12 para variável largura do revestimento, observa-se que os valores variaram entre 21,4 mm a 32,8 mm.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 35, observou-se que a taxa de alimentação, Tx, corrente de soldagem, I, e a velocidade de soldagem, Vs, são estatisticamente significativos, enquanto que as interações das variáveis I*Vs, I*Tx, Vs*Tx e I*Vs*Tx não apresentaram influência estatística significativa apesar de ter apresentado o coeficiente de determinação R^2 igual a 95,62%. Sendo assim foi feita a tentativa de ajustar o modelo retirando os efeitos das interações, resultando em um coeficiente de determinação R^2 igual a 93,95%. Ou seja, a retirada dos efeitos das interações não melhorou a qualidade do ajuste, logo se estudou o modelo com todas as variáveis.

Portanto, a taxa de alimentação e a velocidade de soldagem foram os efeitos de maior relevância para variável de resposta Largura, ambas estando

com valor positivo nas colunas, significando que a maior largura (L) é atingida para os maiores valores da taxa de alimentação e corrente de soldagem. No entanto, o valor negativo apresentado no gráfico na coluna da velocidade de soldagem, indica que quanto menor for a velocidade de soldagem maior será a largura do revestimento.

Figura 35 - Diagrama de Pareto dos efeitos para variável largura L (mm).

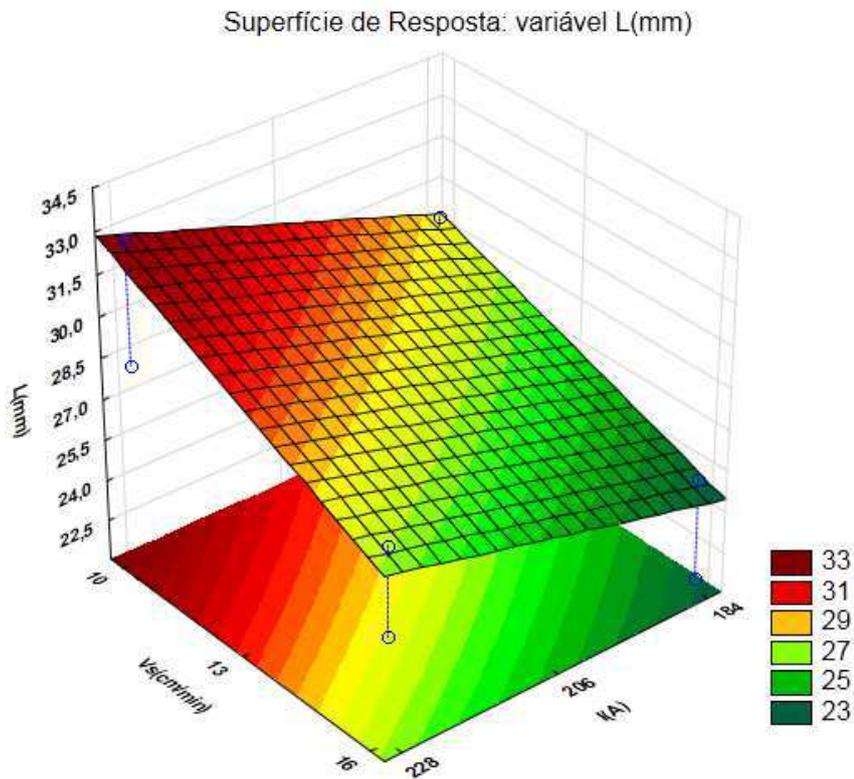


Fonte: Autor

Diante do exposto, foi construída a superfície de resposta mantendo-se o valor da taxa de alimentação fixa em 32 g/min, variando os valores das variáveis corrente I e da velocidade de soldagem Vs.

Observando superfície de resposta representada na Figura 36 para a largura (L) do revestimento observa-se que a máxima largura 33 mm é atingida para valores de corrente de 228 A e velocidade de soldagem de 10 cm/min. Este valor está próximo do valor experimental obtido no experimento 6, nas mesmas condições que é de 32,8 mm.

Figura 36 - Superfície de resposta da Largura L (mm) sob a influência da Corrente de soldagem versus Velocidade de soldagem, fixando-se a Taxa de Alimentação 32 g/min (+1).



Fonte: Autor

De acordo com os resultados obtidos a Taxa de Alimentação e a corrente de soldagem são as variáveis de maior importância para largura (L), conseguindo sempre os maiores valores de largura do revestimento associada à baixa velocidade de soldagem, 10 cm/min. Isto se deve ao aumento da taxa de alimentação de pó, que deve ser acompanhado com o aumento da corrente de soldagem para que se consiga uma divisão do aporte de calor mais favorável à deposição LUGSCHEIDER, 1991 apud SANTOS, 2003).

Resultados semelhantes foram citados por Diaz (2010) que avaliou o processo plasma de arco transferido alimentado com pó (PTA-P), conseguindo maiores valores de largura variando a taxa de alimentação de 1,17 kg/h para 1,50 Kg/h utilizando a corrente de soldagem de na faixa de 160 A e 180 A em baixas velocidades de soldagem. BOND (2008), também observou a tendência do aumento da largura dos revestimentos, com o aumento da taxa de alimentação do pó e da intensidade de corrente. O fato da corrente de

soldagem aumentar a largura é justificado pela alteração do perfil térmico do arco (alongamento das isotermais), fazendo com que regiões do arco com maiores temperaturas alcancem o substrato (SCOTTI & REIS, 2007).

Na Tabela 14 constam os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 14 - Análise de variância para avaliação da largura (L)

Fator	SQ	GL	MQ	F_{calculado}
Regressão	89,1152	7	12,73	9,36
Resíduo	4,0807	3	1,3600	
F.Ajuste	4,0801	1	4,0801	
Erro Puro	0,0006	2	0,0003	
Total	93,1959	10		
R²	95,62%			
F_{tabelado}	8,89		F_{calc}/ F_{tab}=	1,05

Fonte: Autor

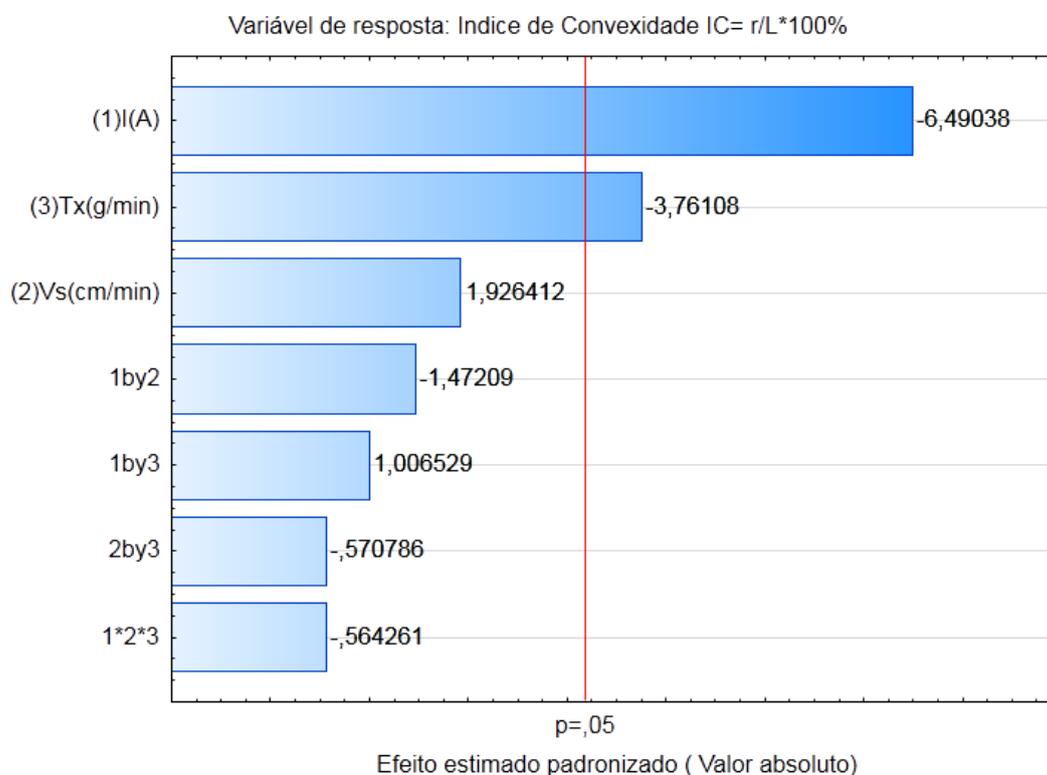
Pode-se concluir, observando os dados da Tabela 14, que o modelo apresentado na Equação 10 tem coeficiente de determinação (R^2) igual a 95,62% das variações obtidas explicado pelo modelo, e com um valor da razão de $F_{calculado}$ por $F_{tabelado}$ de 1,05, indicando que o modelo é estatisticamente significativo com 95% de confiança devido ao valor da razão ser maior que um, porém não é útil para fins preditivos por não apresentar valor da razão maior que quatro (Barros Neto et al., 1996).

5.1.1.3 Efeitos das variáveis do processo sobre o índice de convexidade (IC)

Observa-se nos valores do índice de convexidade $IC=100*r/L$ apresentados na Tabela 12 à variação de 26,82% a 38,51 %.

A Figura 37 mostra que a corrente de soldagem, I, e taxa de alimentação, Tx, teve influência estatística significativa, enquanto que a velocidade de soldagem, Vs e as interações das variáveis I*Vs, I*Tx, Vs*Tx e I*Vs*Tx não apresentaram influência estatística significativa. Entretanto apresentou o coeficiente de determinação R^2 igual a 95,51%.

Figura 37 - Diagrama de Pareto dos efeitos para variável do índice de convexidade (IC).



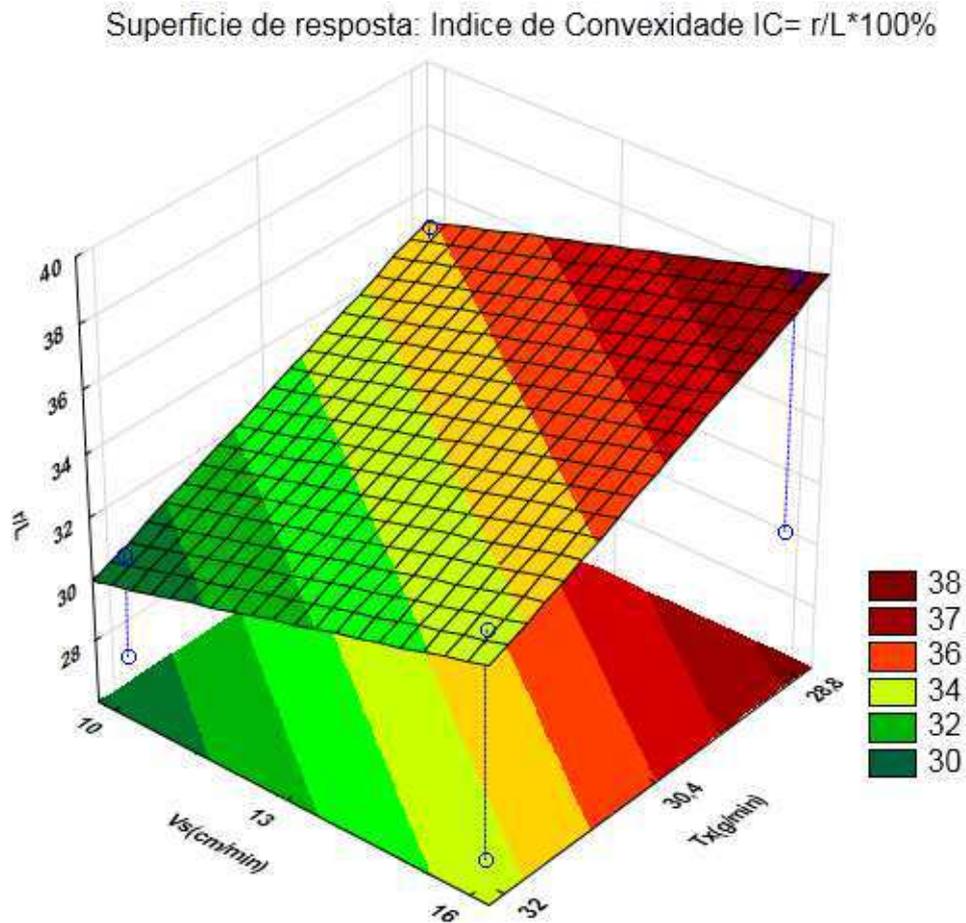
Fonte: Autor

Com isso, foram retirados os efeitos de menores valores de significância para tentar ajustar o modelo das interações, resultando em um o coeficiente de determinação R^2 igual a 89,78%. Ou seja, mais uma vez, a retirada dos efeitos das interações não melhorou a qualidade do ajuste optando-se então por estudar o modelo com todas as variáveis.

Com base nestas informações apresentadas, foi construída a superfície de resposta mantendo-se a corrente de soldagem em 184 A, variando os valores das variáveis taxa de alimentação e da velocidade de soldagem.

A Figura 38 representada para do índice de convexidade ($IC=r/l*100\%$) do revestimento, nota-se que o valor de 30% é obtido com valores de velocidade de soldagem 10 cm/min e taxa de alimentação de 32 g/min. Este valor está próximo do valor experimental obtido no experimento 5 nas mesmas condições que é de 30,74 %.

Figura 38 - Superfície de resposta do índice de convexidade sob a influência da Velocidade de Soldagem versus taxa de alimentação, fixando-se a corrente de soldagem 184 (-1).



Fonte: Autor

Tais resultados obtidos para o índice de convexidade estão de acordo com a literatura (SILVA, 2000) a qual estabelece que valores próximos de 30 % representam condições desejáveis para a relação largura (L) e reforço de cordão (r). Já (COSTA & RIBEIRO, 2001), informam que o índice de convexidade deve sempre ser inferior a 30%, como critério de qualidade.

Na Tabela 15 mostra os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 15 - Análise de variância para avaliação do índice de convexidade (IC)

Fator	SQ	GL	MQ	$F_{\text{calculado}}$
Regressão	115,5081	7	16,50	9,12
Resíduo	5,4309	3	1,81	
F.Ajuste	5,1116	1	5,111	
Erro Puro	0,3193	2	0,159	
Total	120,9390	10		
R^2	95,51%			
F_{tabelado}	8,89		$F_{\text{calc}}/ F_{\text{tab}}=$	1,025327

Fonte: Autor

Portanto, baseado nos dados da Tabela 15, que o modelo apresentado na Equação 11 tem coeficiente de determinação (R^2) igual a 95,62% das variações obtidas, apresentando um valor da razão de $F_{\text{calculado}}$ por F_{tabelado} de 1,025, indicando que o modelo é estatisticamente significativo com 95% de confiança, porém não sendo útil para fins preditivos (Barros Neto et al., 1996).

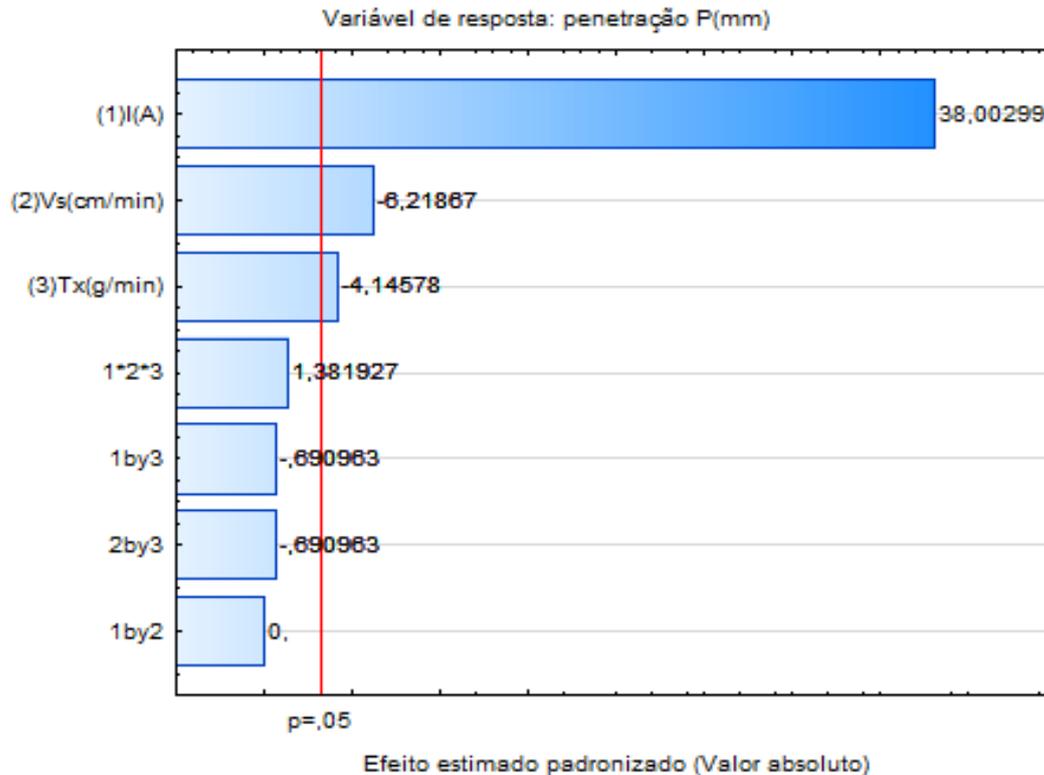
5.1.1.4 Efeitos das variáveis do processo sobre a penetração (P)

A Tabela 11 apresenta os resultados para valores variável de resposta penetração P(mm), onde mostra a variação de 0,47 mm a 1,67 mm.

A Figura 39 mostra que a corrente de soldagem, I, a velocidade de soldagem, Vs, e a taxa de alimentação, Tx, mostraram influência estatística significativa, enquanto que as interações das variáveis I*Vs, I*Tx, Vs*Tx e I*Vs*Tx não apresentaram tal influência. Entretanto apresentou o coeficiente de determinação R^2 igual a 99,8%, não havendo portanto a necessidade da retirada dos efeitos de menores valores para possível ajuste do modelo.

Os sinais positivos na coluna da corrente de soldagem do diagrama de Pareto, indica que à medida que a corrente de soldagem aumenta, ocorre um aumento na penetração no revestimento. Já para a velocidade de soldagem e a taxa de alimentação os valores negativos das colunas indicam que a medidas que ambas variáveis diminuem, promove uma maior penetração.

Figura 39 - Diagrama de Pareto dos efeitos para variável penetração P(mm)

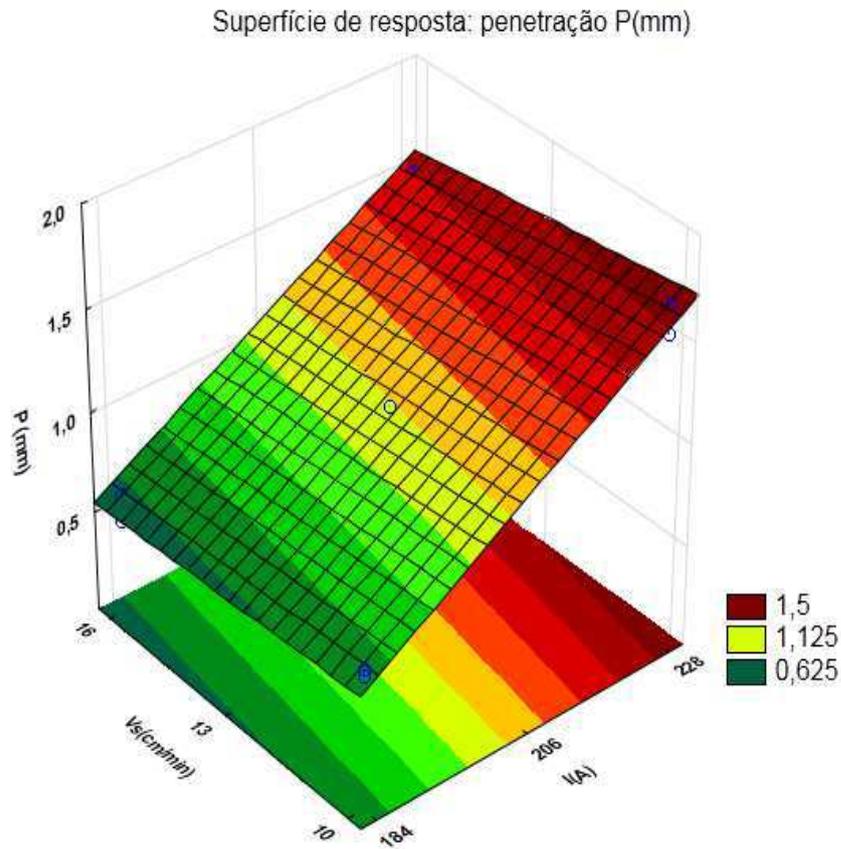


Fonte: Autor

Com base nestas informações apresentadas, foi construída a superfície de resposta mantendo-se a taxa de alimentação de 32 g/min, variando os valores das variáveis taxa de alimentação e da velocidade de soldagem.

A Figura 40 mostra que a menor penetração atingida nos revestimentos foi para os valores de corrente de 184 A e velocidade de soldagem 16 cm/min, sendo aproximadamente de 0,62 mm. Este valor está próximo do valor experimental obtido no experimento 7 nas mesmas condições que é de 0,47 mm.

Figura 40 - Superfície de resposta da penetração sob a influência da corrente de soldagem versus Velocidade de soldagem, fixando-se a taxa de alimentação 32 g/min (+1).



Fonte: Autor

Na Tabela 16 mostra os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 16 - Análise de variância para avaliação da penetração (P).

Fator	SQ	GL	MQ	F _{calculado}
Regressão	1,7489	7	0,25	214,71
Resíduo	0,0035	3	0,00116	
F.Ajuste	0,000024	1	0,00002	
Erro Puro	0,0035	2	0,00173	
Total	1,7524	10		
R²	99,8%			
F_{tabelado}	8,89		F_{calc}/ F_{tab}=	24,15

Fonte: Autor

Portanto, os dados da Tabela 16, informa que o modelo apresentado na Equação 5 tem coeficiente de determinação (R^2) igual a 99,8% das variações obtidas explicado pelo modelo, equação 12, e com um valor da razão de $F_{\text{calculado}}$ por F_{tabelado} igual a 24,15 indicando que o modelo é estatisticamente significativo com 95% de confiança com fins preditivos (Barros Neto et al., 1996).

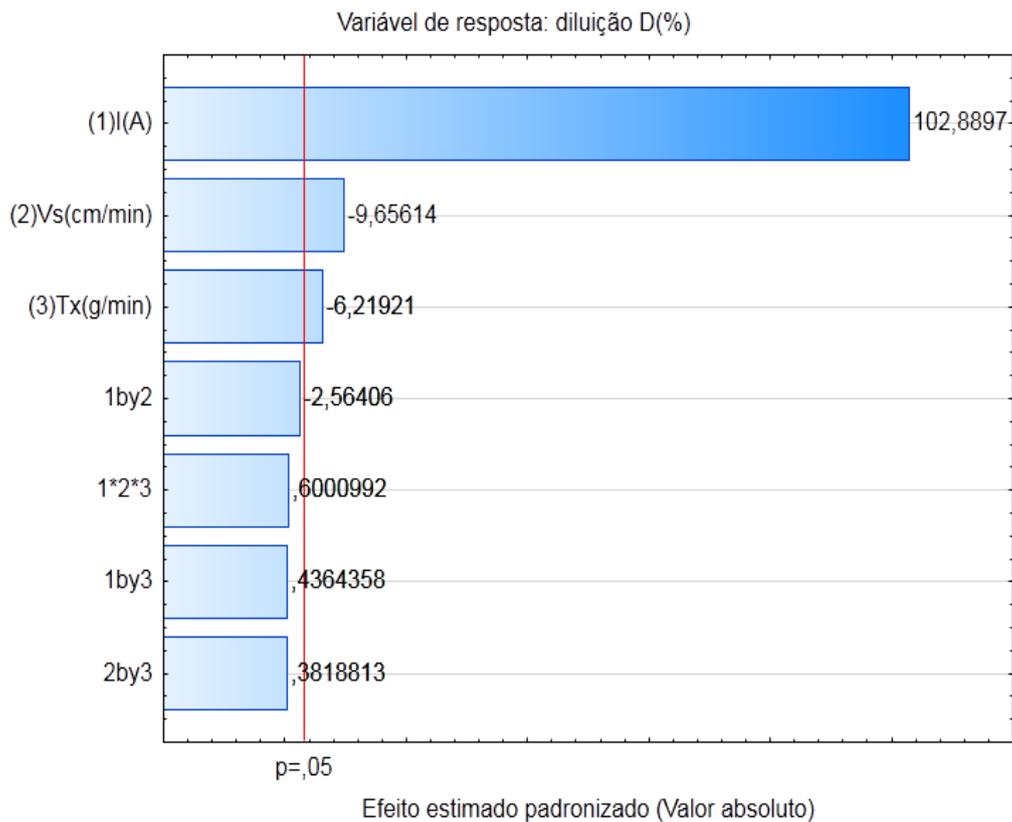
5.1.1.5 Efeitos das variáveis do processo sobre a diluição (D%)

Os resultados apresentados na Tabela 12 referentes à variável diluição D(%) mostraram valores variando de 4,39% a 15,33%.

Analisando os resultados apresentados na Figura 41, verifica-se que a corrente de soldagem, I, velocidade de soldagem, Vs, e a taxa de alimentação, Tx, mostraram influência estatística significativa, enquanto que as interações das variáveis I*Vs, I*T_x, Vs*T_x e I*Vs*T_x não apresentaram influência. Entretanto apresentou o coeficiente de determinação R^2 igual a 99,8%.

Os valores positivos na coluna da corrente de soldagem do diagrama de Pareto (Figura 41), indica que à medida que a corrente de soldagem aumenta, o aumento da diluição é favorecido. Já para a velocidade de soldagem e a taxa de alimentação os valores negativos das colunas indicam que a medidas que ambas diminuem a diluição aumenta.

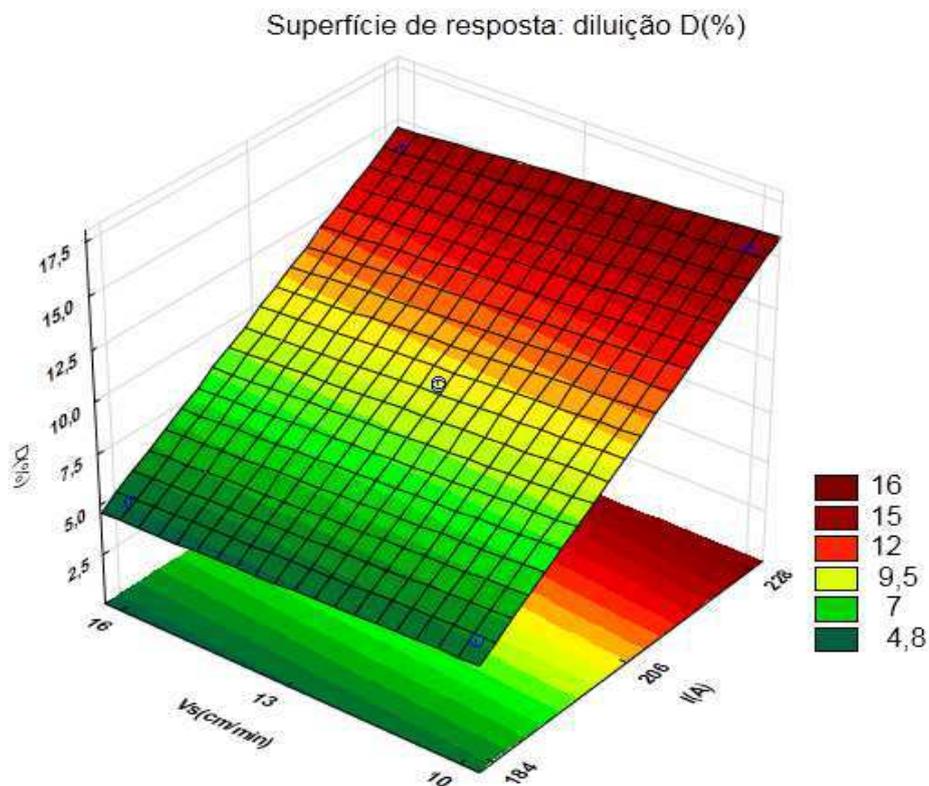
Figura 41 - Diagrama de Pareto dos efeitos para variável diluição D (%).



Fonte: Autor

A partir da análise estatística dos resultados da diluição (%) foi gerada a superfície de resposta, ver Figura 42, na qual observa-se que o menor percentual da diluição (4,8 %) ocorre para valores de corrente de 184 A e velocidade de soldagem 16 cm/min. Estando esse valor próximo do valor experimental obtido no experimento 7 nas mesmas condições que é de 4,39 %.

Figura 42 - Superfície dos fatores Corrente e a velocidade de soldagem na diluição(%), fixando-se a Taxa de Alimentação 32 g/min (+1).



Fonte: Autor

De acordo com os resultados apresentados na Figura 42, com a elevação da corrente de soldagem ocorre um aumento na diluição. Isso se deve ao aumento da energia de soldagem, que proporciona um aumento na área fundida sobre a poça de fusão.

Com relação à velocidade de soldagem, os resultados mostram que à medida que se aumenta a velocidade de soldagem a diluição é reduzida. Isto se deve ao fato da velocidade ser inversamente proporcional à energia de soldagem, proporcionando uma menor quantidade de calor no substrato, e promovendo uma maior redução na área de metal depositado (KEJELIN et al., 2007; PESSOA, 2009).

Já para a taxa de alimentação, a fixação do valor 32 g/min (nível máximo adotado experimentalmente) na construção da superfície, foi devido ao fato de maiores taxas de alimentação proporcionar menores percentuais de diluição.

Isto por sua vez, é devido à coluna do arco plasma ser influenciada pela taxa de alimentação de pó, ou seja, um aumento na taxa de alimentação de pó restringe e resfria a coluna do arco plasma (Deuis et al,1997).

Os resultados obtidos demonstram que do ponto de vista da aplicação para revestimento, o processo PTA-P se apresenta adequado, pois produz valores de diluição da ordem de 5 a 10 % (GATTO, 2009), muito inferior ao que se obtém com outros processos de soldagem a arco da ordem de 20 a 25 % (DÍAZ, 2010).

Na Tabela 17 apresenta os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 17 - Análise de variância para avaliação da Diluição D(%).

Fator	SQ	GL	MQ	F_{calculado}
Regressão	180,1882	7	25,74	1532,21
Resíduo	0,0504	3	0,01680	
F.Ajuste	0,035933	1	0,03593	
Erro Puro	0,0145	2	0,00723	
Total	180,2386	10		
R²	99,7%			
F_{tabelado}	8,89		F_{calc}/ F_{tab}=	172,35

Fonte: Autor

Os dados da Tabela 17, informa que o modelo apresentado na Equação 5 tem coeficiente de determinação (R^2) igual a 99,7% das variações obtidas explicado pelo modelo, equação 13, e com um valor da razão de $F_{calculado}$ por $F_{tabelado}$ igual a 172,35, indicando que o modelo é estatisticamente significativo com 95% de confiança com fins preditivos (Barros Neto et al., 1996).

5.1.2 Análise metalografica dos revestimentos por PTA-P

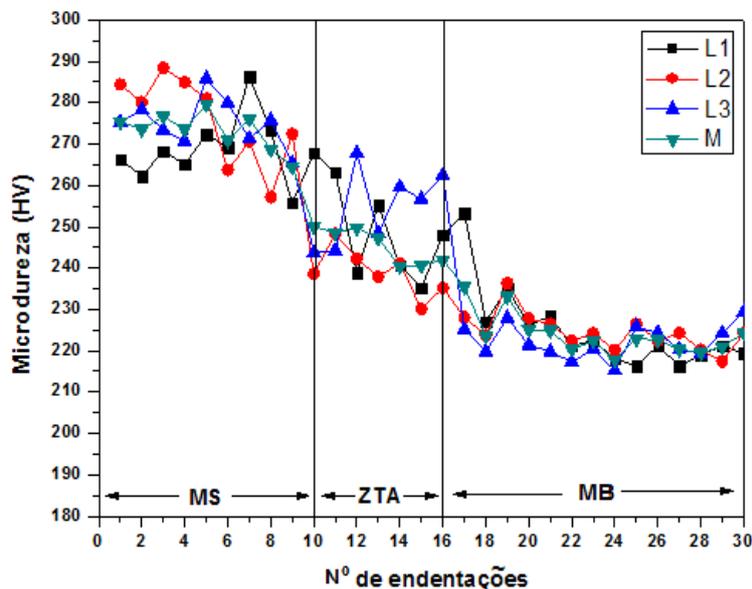
5.1.2.1 Microdureza

Foi levantado o perfil de microdureza dos revestimentos ao longo da seção transversal dos depósitos, segundo a metodologia das linhas verticais,

Figura 30, compreendendo as regiões do metal de solda (MS), zona termicamente afetada (ZTA) e metal de base (MB), para as condições de deposição com maior e menor nível de energia de soldagem dentre os 11 experimentos estudados pela deposição por PTA-P, ou seja, o experimento 2 e 3 com energia de soldagem igual a 18,99 kJ/cm e 8,34 KJ/cm respectivamente.

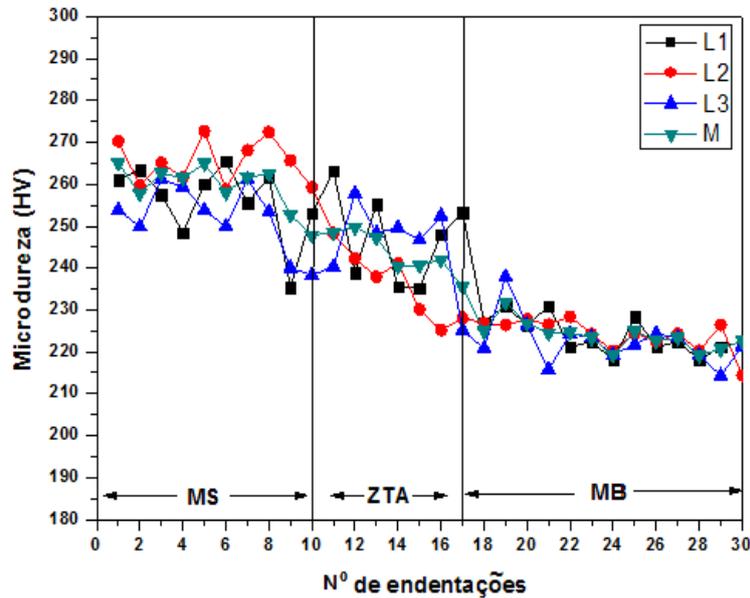
Os gráficos das Figuras 43 e 44 mostram os valores da microdureza ao longo das regiões MS, ZTA e MB, para os experimentos 2 e 3, onde nota-se o comportamento semelhante nas regiões, ou seja, o MS apresenta um nível de microdureza superior ao da ZTA. Em termos de valores médios, para a $H = 18,99$ kJ/cm as microdurezas do MS e ZTA foram, respectivamente, $(259,44 \pm 4,31)$ HV e $(243,41 \pm 5,5)$ HV e para $H = 8,34$ kJ/cm, as microdurezas do MS e ZTA foram, $(272,0 \pm 6,97)$ HV e $(261,37 \pm 8,04)$ HV respectivamente. O MB apresentou uma microdureza de $(223,78 \pm 3,26)$ HV e $(225,78 \pm 4,06)$ HV

Figura 43 - Microdureza ao longo das linhas verticais para $H = 8,34$ kJ/cm Experimento 3 – PTA-P.



Fonte: Autor

Figura 44 - Microdureza ao longo das linhas verticais para H = 18,99 KJ/cm
Experimento 2 – PTA-P.



Fonte: Autor

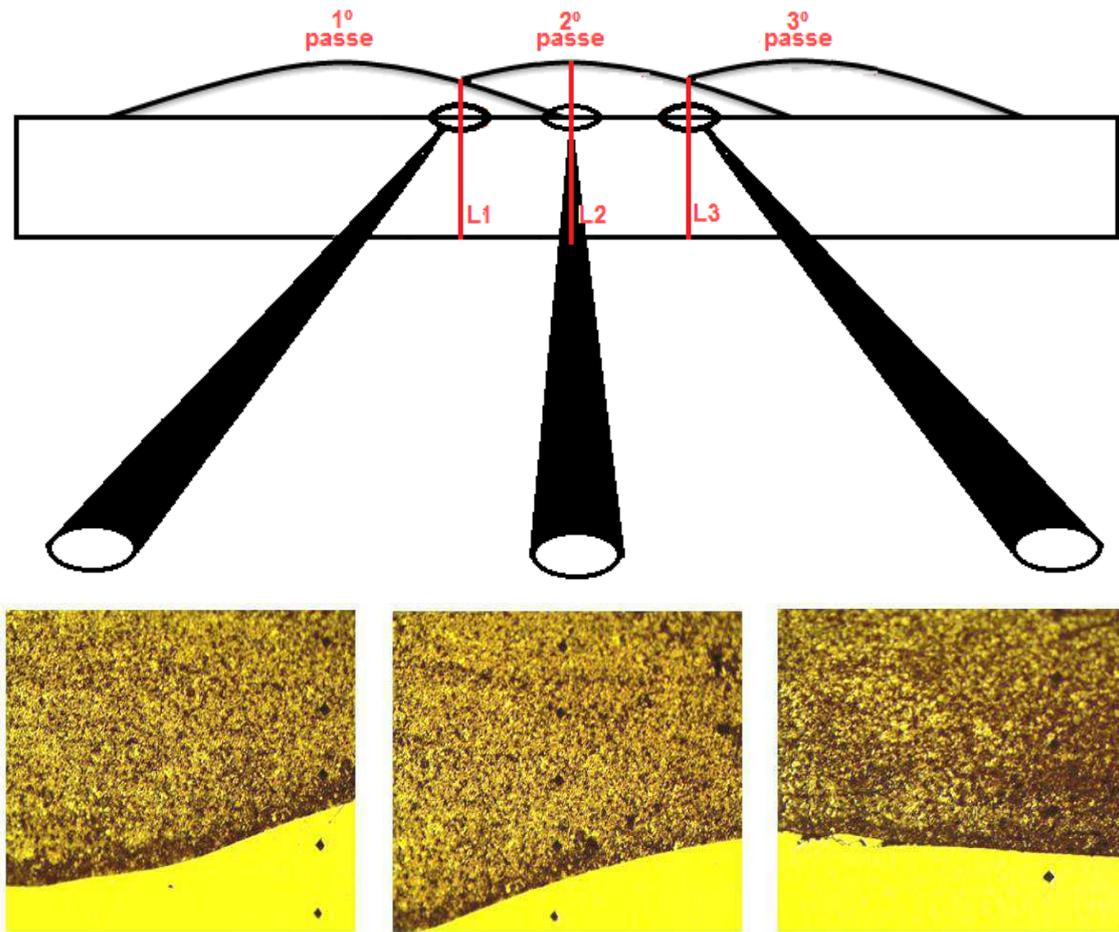
Os resultados mostram um aumento de 17,96 HV no valor médio da microdureza da ZTA ao reduzir a energia de soldagem de H= 18,99 KJ/cm para H=8,34 kJ/cm. Energias de soldagem mais baixas resulta em taxas de resfriamento mais elevadas e, conseqüentemente, uma microdureza mais elevada na ZTA. KEJELIN et al (2006) obtiveram um aumento de 20HV na microdureza da ZTA quando reduziram a energia de soldagem de 1500KJ/cm para 1100kJ/cm. Este fato pode ser explicar em função da variação na taxa de resfriamento e, conseqüentemente, nos níveis de microdureza da ZTA.

5.1.2.2 Microestrutura

A ilustração da Figura 45 mostra uma pequena variação da microestrutura ao longo da interface do revestimento no experimento 2 com H=18,99 KJ/cm. A região do 2° passe (linha 2), ou seja, parte central do revestimento apresentou uma ZTA com uma microestrutura um pouco mais refinada, com grãos menores que as regiões entre passes, apresentando menores valores de microdureza. Tal fato está relacionado com a influência da

energia de soldagem do 2º passe depositado sobre o 1º passe do revestimento e 3º passe depositado sobre o 2º passe do revestimento. Isto também é influenciado pelo valor da sobreposição utilizado, ou seja, de $\frac{1}{2}$, visto que BATISTA (2011) ao usar uma sobreposição de $\frac{1}{3}$ verificou maior refinamento nas regiões entre passes.

Figura 45 - Variação de microestrutura ao longo da interface MS/Substrato Experimento 2 (H=18,99 KJ/cm) – PTA-P.



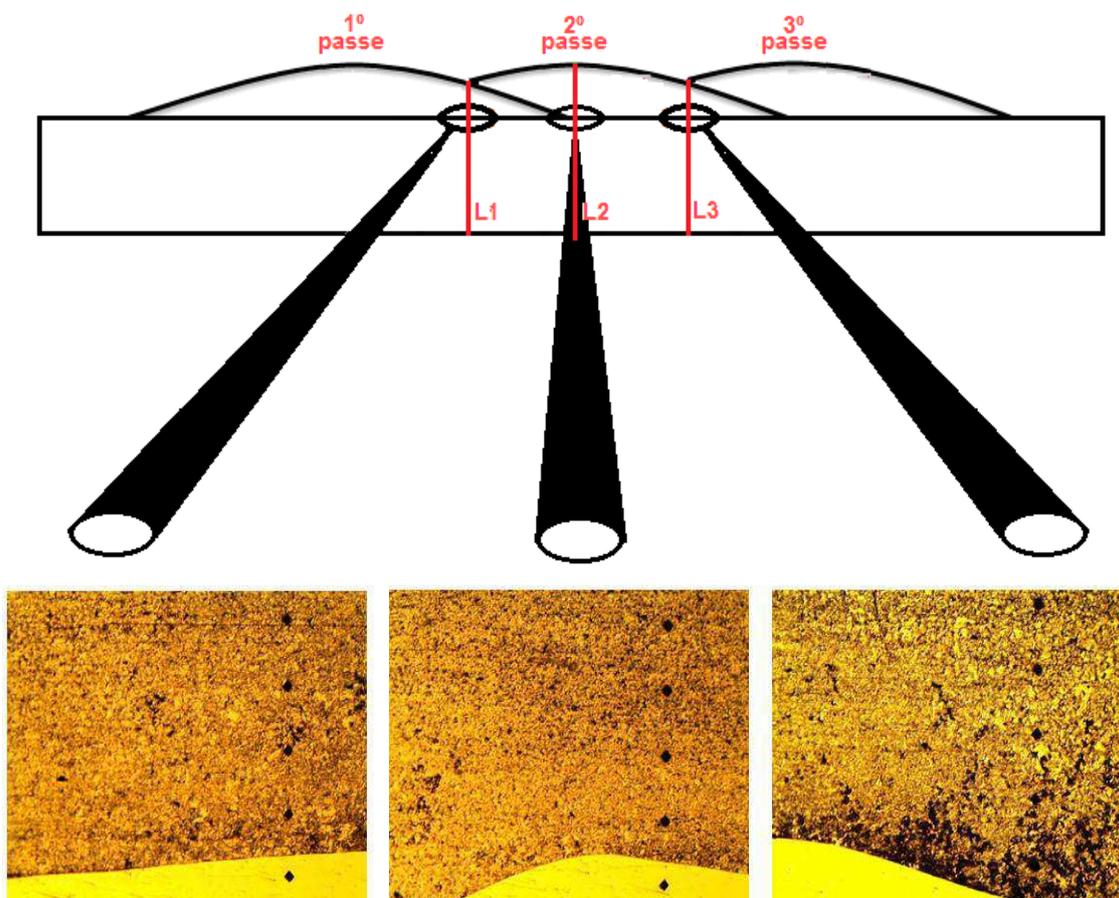
Fonte: Autor

As regiões entre os passes de revestimento (interseção), Linha L1 e L3 apresentaram uma microestrutura um pouco menos refinada, confirmando assim os maiores valores de dureza apresentados.

Analogamente aos revestimentos depositados com energia de soldagem H= 18,99 KJ/cm, também houve refinamento de grãos na ZTA região central, linha L2. Isto pode ser verificado na Figura 46. Este refino certamente influencia

os valores da microdureza e conseqüentemente reduz a fragilidade nesta região.

Figura 46 - Variação de microestrutura ao longo da interface MS/Substrato Experimento 3 ($H=8,34$ KJ/cm) – PTA-P.



Fonte: Autor

5.1.3 Avaliação da Corrosão dos Revestimentos depositados por PTA-P

Utilizou-se o planejamento fatorial completo de 2^3 , com 8 experimentos e 3 pontos centrais para analisar os efeitos das variáveis dependentes, corrente (I), velocidade de soldagem (V_s) e taxa de alimentação (T_x), com relação as independentes, Resistência à polarização (R_p), Potencial de Corrosão (E_{corr}), através da técnica de Polarização Potenciodinâmica linear. A Tabela 18 apresenta as variáveis utilizadas e os níveis estudados no referido planejamento.

Tabela 18 - Resultados da avaliação da resistência à corrosão.

Experimento	Variáveis Independentes			Variáveis dependentes				
	I(A)	Vs (cm/min)	Tx (g/min)	R _p (KΩ)	E _{corr} (V)	% Fe	D%	H (KJ/cm)
1	184	10	28,8	179,34	-0,2630	3,96	5,65	12,86
2	228	10	28,8	578,48	-0,1897	15,18	15,33	18,99
3	184	16	28,8	151,77	-0,2877	3,60	5,02	8,34
4	228	16	28,8	267,30	-0,2079	10,88	14,12	12,38
5	184	10	32	178,70	-0,2652	6,62	5,06	13,58
6	228	10	32	485,83	-0,2073	15,84	14,71	18,10
7	184	16	32	143,55	-0,3003	1,43	4,39	7,61
8	228	16	32	248,93	-0,2331	10,62	13,68	10,56
9	206	13	30,4	194,60	-0,2518	6,94	10,59	13,38
10	206	13	30,4	192,60	-0,2592	7,97	10,48	13,08
11	206	13	30,4	236,01	-0,2438	9,37	10,61	13,98

Fonte: Autor.

Diante dos resultados experimentais obtidos, foi adotado um nível de confiabilidade dos resultados de 95%, através da ferramenta estatística usando o programa *Statistica* versão 10 para obter um modelo linear que relacione as variáveis dependentes: Resistência à polarização (R_p), Potencial de Corrosão (E_{corr}), com as variáveis independentes estudadas.

As equações 14 e 15 representam os modelos estabelecidos para as variáveis dependentes, onde os coeficientes em negrito são os efeitos estatisticamente significativos ao nível de 95% de confiança.

$$R_p = \mathbf{259,73} - \mathbf{115,89} \cdot I - \mathbf{76,35} \cdot Vs - 14,98 \cdot Tx - 60,67 \cdot I \cdot Vs$$

Equação (14)

$$E_{corr} = \mathbf{-0,2462} + \mathbf{0,0347} \cdot I - \mathbf{0,012} \cdot Vs - 0,007 \cdot Tx - 0,0019 \cdot I \cdot Vs - 0,003 \cdot I \cdot Tx - 0,02 \cdot Vs \cdot Tx + 0,0003 \cdot I \cdot Vs \cdot Tx$$

Equação (15)

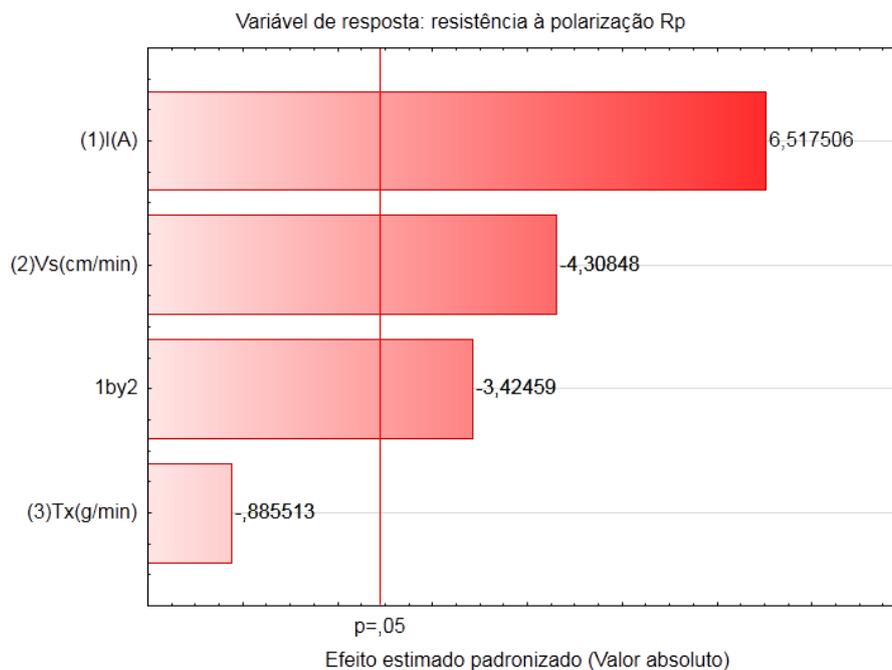
Onde: I = corrente; Vs= velocidade de soldagem, Tx= taxa de alieimntação e I*Vs, I*Tx, Vs*Tx e I*Vs*Tx são as interações das variáveis.

5.1.3.1 Efeitos das variáveis sobre a resistência à polarização (R_p)

Observa-se pelos resultados apresentados na Tabela 18 que os valores da Resistência à polarização (R_p) variaram de 143,55 K Ω a 578,48 K Ω .

A Figura 47 apresenta o diagrama de Pareto, onde observa-se que a corrente de soldagem, I , é o efeito de maior importância para variável resistência à polarização, estando com o sinal na coluna positivo do diagrama, isto significa que a maior resistência à polarização é atingida para maiores valores da corrente de soldagem. A velocidade de soldagem vem em segundo como efeito de maior relevância, como o valor na coluna negativo, indicando que a resistência polarização aumenta para menores valores da velocidade de soldagem.

Figura 47 - Diagrama de Pareto dos efeitos para resistência a polarização.

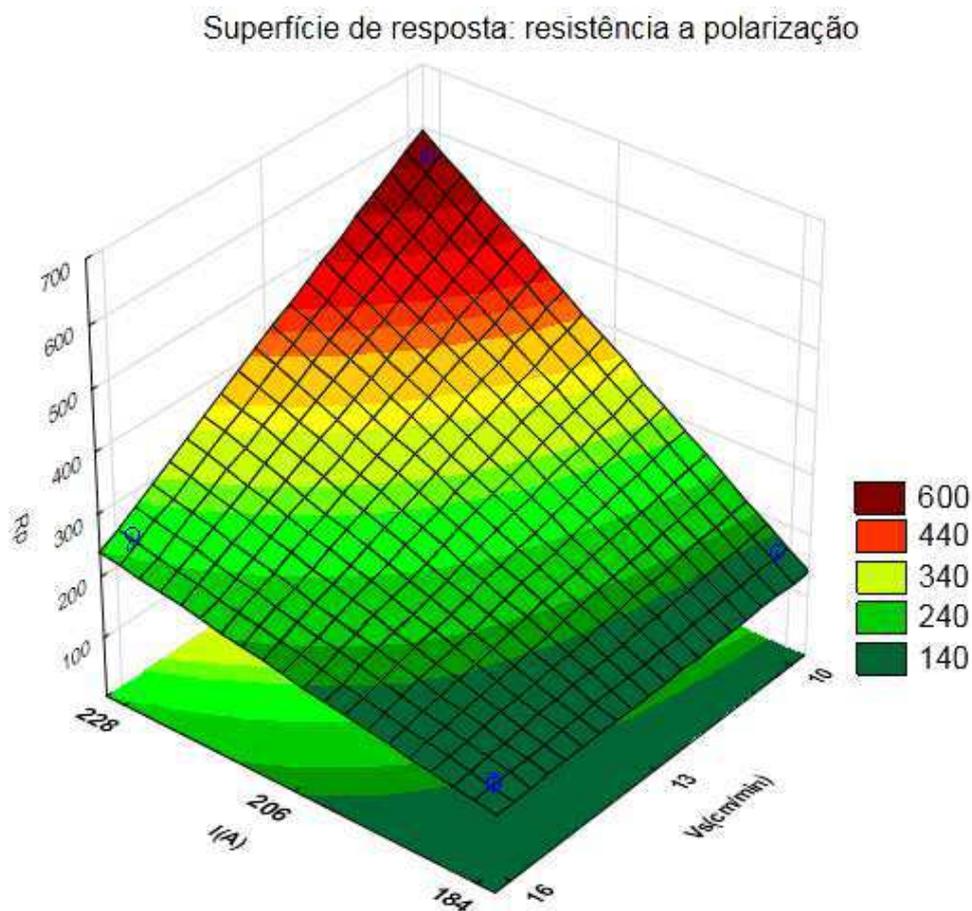


Fonte: Autor

Com base nestas informações apresentadas, foi construída a superfície de resposta mantendo-se a taxa de alimentação de 28,8 g/min, variando os valores da corrente de soldagem no intervalo de 184 A a 228 A e a velocidade soldagem variando no intervalo de 10 cm/min a 16 cm/min.

A Figura 48 mostra o efeito dos valores da corrente em função da resistência polarização dos revestimentos. Pode-se observar que com a elevação da corrente de soldagem aumentam as propriedades anti-corrosivas (resistência à polarização), enquanto que, com a diminuição da velocidade aumentam a resistência à polarização, atingindo um valor máximo aproximadamente de 600 KΩ. Este valor está próximo do valor experimental obtido no experimento 2 nas mesmas condições que é de 578,48 KΩ. Este comportamento pode está associada à energia de soldagem imposta durante a deposição, uma que a energia de soldagem depende diretamente corrente e inversamente da velocidade de soldagem.

Figura 48 - Superfície de resposta da resistência à polarização sob a influência da Corrente versus velocidade de soldagem, fixando-se a Taxa de Alimentação 28,8 g/min (-1).



Fonte: Autor.

Na Tabela 19 apresenta os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 19 - Análise de variância para avaliação da resistência à polarização R_p

Fator	SQ	GL	MQ	F_{calculado}
Regressão	185335,61	4	46293,82	18,39
Resíduo	15053,65	6	2517,58	
F.Ajuste	13852,58	4	3470,89	
Erro Puro	1201,07	2	610,96	
Total	200389,27	10		
R²	92,45%			
F_{tabelado}	4,53		F_{calc}/ F_{tab}=	4,08

Fonte: Autor

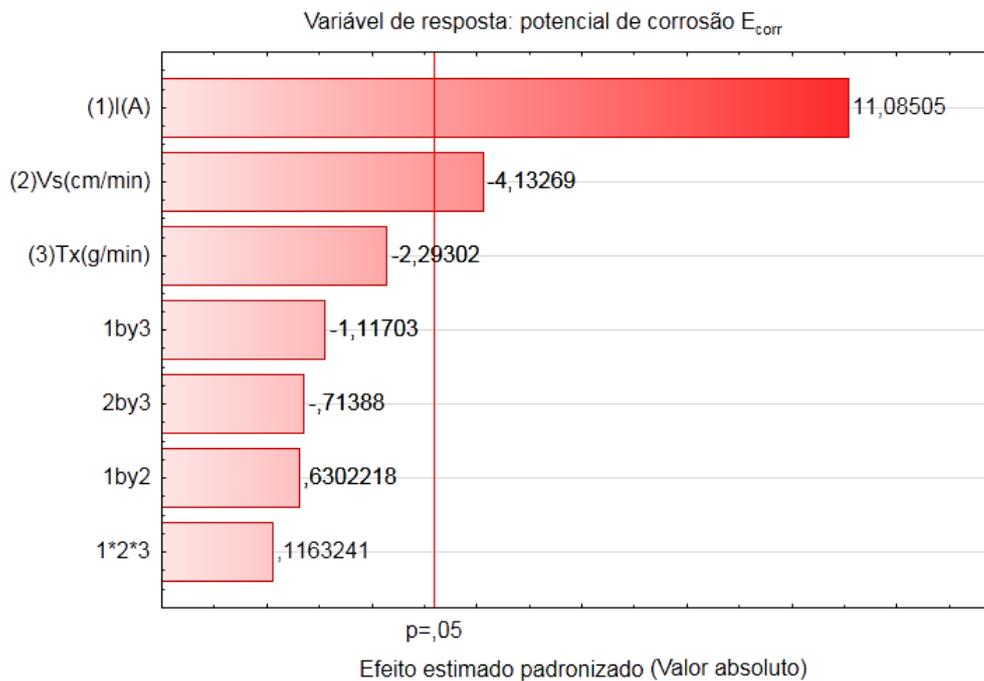
Portanto, os dados da Tabela 19, informa que o modelo apresentado na Equação 14 tem coeficiente de determinação (R^2) igual a 92,45%. Apesar do valor de R^2 ter sido inferior a 95%, o modelo é significativo devido ao valor da razão de $F_{\text{calculado}}$ por F_{tabelado} ser maior que 4, indicando que o modelo é estatisticamente significativo com fins preditivos (Barros Neto et al., 1996).

5.1.3.2 Efeitos das variáveis sobre o potencial de corrosão (E_{corr})

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 18, verificou-se que os valores da Potencial de corrosão, E_{corr} variaram de -0,3003 V a -0,1897 V.

Através do diagrama de Pareto da Figura 49, nota-se que a corrente de soldagem, I , é o efeito de maior importância para variável potencial de corrosão, estando com valor na coluna positivo, isto indicando que o E_{corr} aumenta com a elevação da corrente de soldagem. A velocidade de soldagem tem efeito significativo, estando com o valor negativo na coluna do diagrama, indicado que para menores valores da velocidade aumenta o valor de E_{corr} . A taxa de alimentação e as demais não influenciaram estatisticamente.

Figura 49 - Diagrama de Pareto dos efeitos para Potencial de corrosão.

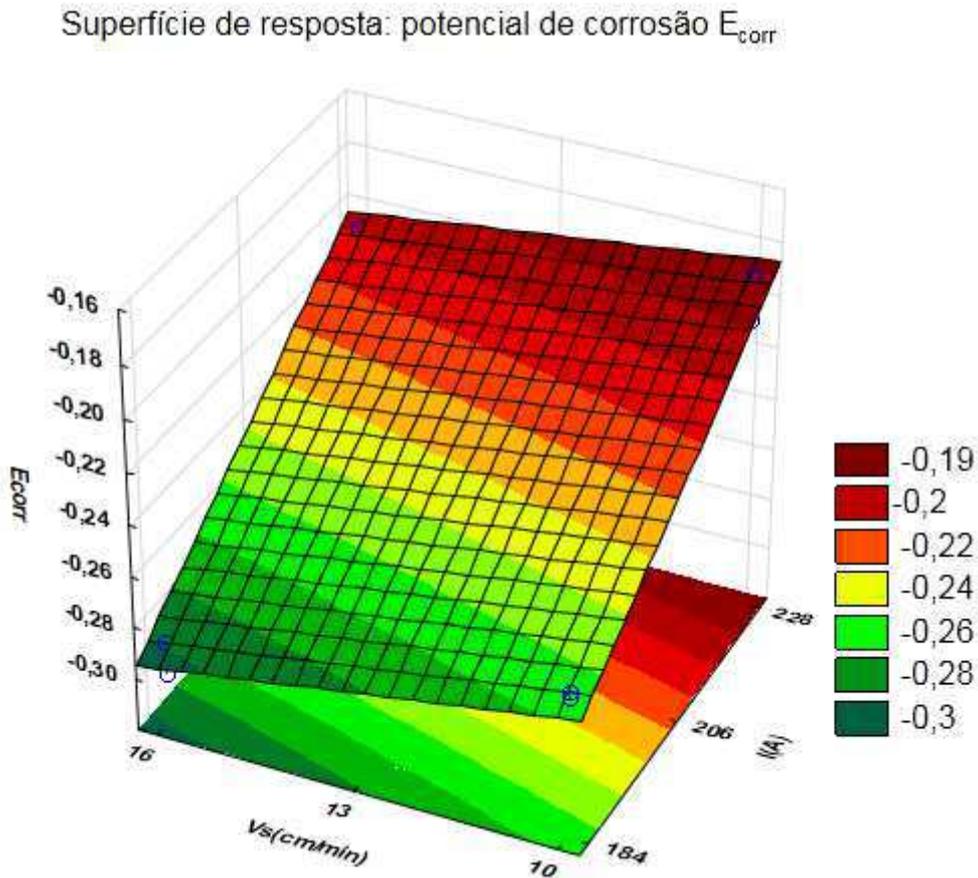


Fonte: Autor.

Com as informações apresentadas, foi construída a superfície de resposta mantendo-se a taxa de alimentação de 28,8 g/min, variando os valores da corrente de soldagem no intervalo de 184 A a 228 A e a velocidade soldagem variando no intervalo de 10 cm/min a 16 cm/min.

A Figura 50 mostra o efeito dos valores da corrente e velocidade de soldagem em função do Potencial de corrosão dos revestimentos. Pode-se observar que com o aumento da corrente de soldagem, aumento o valor de E_{corr} , com a diminuição da velocidade aumentam E_{corr} , atingindo um valor máximo aproximadamente de -0,190 V. Este valor está próximo do valor experimental obtido no experimento 2 nas mesmas condições que é de 0,1897 V.

Figura 50 - Superfície de resposta da resistência à polarização sob a influência da Corrente versus velocidade de soldagem, fixando-se a Taxa de Alimentação 28,8 g/min (-1).



Fonte: Autor.

Na Tabela 20 apresenta os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 20 - Análise de variância para avaliação do Potencial de corrosão.

Fator	SQ	GL	MQ	$F_{calculado}$
Regressão	0,0116	7	0,16	17,07
Resíduo	0,0002	3	0,00960	
F.Ajuste	0,000117	1	0,00902	
Erro Puro	0,0001	2	0,00989	
Total	0,0118	10		
R^2	98,05%			
F tabelado	8,89		F5%	2,37

Fonte: Autor

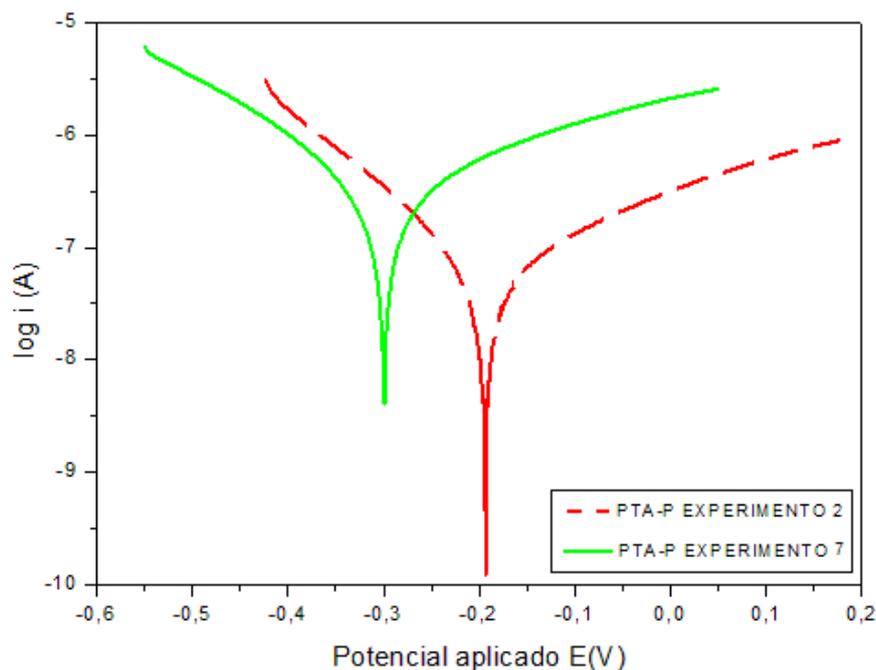
Portanto, os dados da Tabela 20, informa que o modelo apresentado na Equação 7 tem coeficiente de determinação (R^2) igual a 97,55% das variações obtidas explicado pelo modelo da equação 15 e com um valor da razão de $F_{\text{calculado}}$ por F_{tabelado} igual a 1,92, indicando que o modelo é estatisticamente significativo com 95% de confiança (Barros Neto et al., 1996).

5.1.4 Resistência à corrosão

A avaliação da resistência à corrosão dos revestimentos foi realizada através da técnica de polarização potenciodinâmica linear (PPL) e para confirmação utilizou-se da técnica espectroscopia de impedância eletroquímica.

A Figura 51 mostra as curvas de polarização potenciodinâmica dos revestimentos dos experimentos 2 e 7, os quais apresentaram a maior e a menor diluição, 15,33% e 4,39%, respectivamente dentre os 11 experimentos. Assim o experimento 2 com maior diluição, apresentou potencial de corrosão mais positivo que a amostra do experimento 7 com menor diluição, onde indicou maiores propriedades anti-corrosivas.

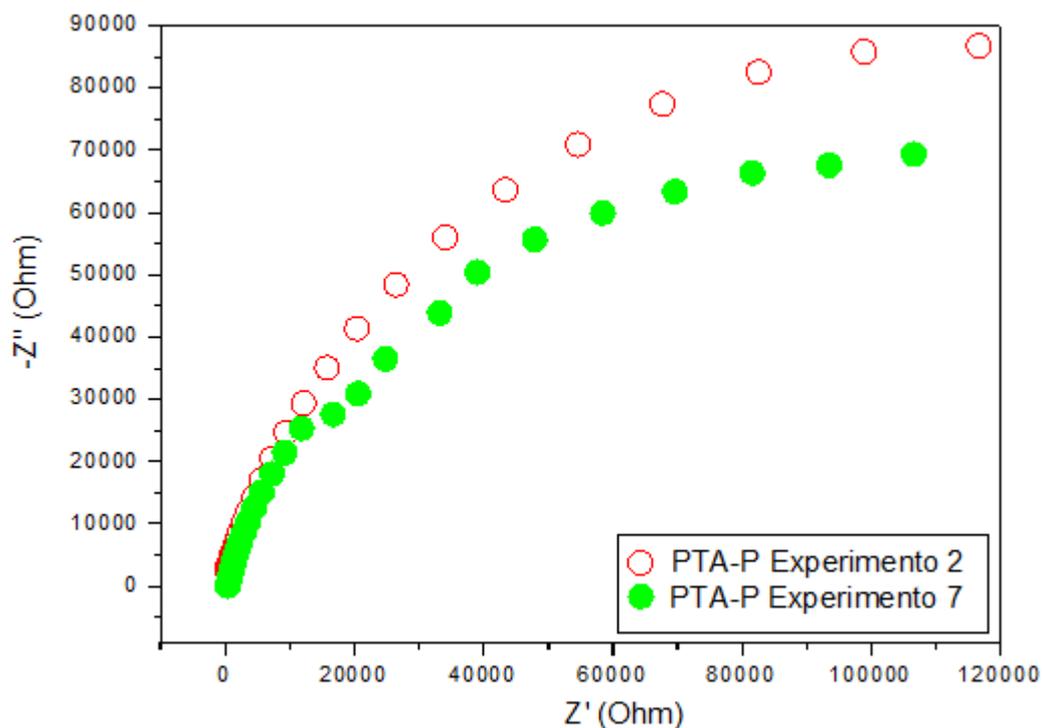
Figura 51 - Curva de polarização dos experimentos 2 e 7 por PTA-P.



Fonte: Autor

Para confirmar os resultados obtidos nas curvas de PPL sobre a resistência à corrosão, foram realizadas medidas de espectroscopia de impedância eletroquímica. A Figura 52 mostra o diagrama de impedância dos revestimentos com Inconel 625 dos mesmos experimentos avaliadas por PPL.

Figura 52 - Diagrama de impedância dos experimentos 2 e 7 por PTA-P.



Fonte: Autor

Nesse diagrama, quanto mais alta for a curva, maior é o valor da resistência à polarização, R_p , cujo valor é tomado no eixo das abscissas traçando-se um semicírculo que melhor se ajuste à curva e maior será a resistência à corrosão do material exposto ao meio corrosivo (GENTIL, 2007; JAMBO e FÓFANO, 2008).

Assim, os resultados obtidos pela técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica confirmam os valores encontrados pela PPL, que indicou que os experimentos com maior nível de diluição e conseqüentemente com maior teor de Fe, apresentaram maior resistência à polarização. Tais resultados são contrários aos resultados encontrados por (SILVA, 2013 & BATISTA, 2011), que encontraram resultados que mostram que quanto menor a diluição maior a resistência à polarização.

Entretanto, os resultados encontrados podem está relacionado com a diferença de energia de soldagem imposta nos experimentos, uma vez que o experimento 2 foi conduzindo com uma energia de soldagem de 18,99 KJ/cm enquanto que o experimento 7 foi com 7,61 KJ/cm, ver Tabela 7. Assim a elevada energia de soldagem leva a uma velocidade de resfriamento menor e, conseqüentemente, ao favorecimento de um adequado balanceamento químico entre as fases, tanto na zona fundida como na ZTA, levando a uma maior resistência à corrosão localizada (Cardoso Júnior et al., 2012). A explicação também pode está relacionada com o nível de tensões residuais compressivas, ou seja, quanto mais elevada a energia de soldagem maior será o nível de tensões residuais compressivas, conseqüentemente maior a resistência à corrosão. (MELO, 2013) obteve um aumento de - 41 MPa na tensão residual compressiva quando aumentou a energia de soldagem de 12,90 KJ/cm para 14 KJ/cm, resultando em uma resistência a polarização de 194 KΩ (12,90 KJ/cm) e 206 KΩ (14 KJ/cm).

5.2 Revestimentos depositados por soldagem MIG

5.2.1 Avaliação dos parâmetros geométricos e diluição

Para avaliação dos parâmetros geométricos e diluição dos revestimentos utilizou-se a ferramenta de planejamento experimental e a metodologia de Superfície de Resposta (MSR), onde foi possível investigar a influência das variáveis do processo e a forma de interação entre elas, bem como obter o valor das variáveis que maximizem os resultados esperados.

A Tabela 21 apresenta a matriz de planejamento fatorial 2³ e os resultados experimentais da deposição por soldagem MIG com relação as variáveis dependentes: reforço r(mm), largura L(mm), índice de convexidade $IC=r/L*100\%$, profundidade P(mm) e diluição (D%), quando se faz variar as variáveis independentes: tensão U(V), velocidade de alimentação Va(m/min) e velocidade de soldagem (Vs).

Tabela 21 - Matriz de planejamento fatorial 2³ e resultados obtidos por MIG.

Experimento	Variáveis Independentes			Variáveis dependentes				
	U(V)	Va (m/min)	Vs (cm/min)	r (mm)	L (mm)	P (mm)	D%	IC=100*r/L (%)
	1	26	6	20	5,56	21,88	2,36	16,25
2	32	6	20	4,41	28,7	3,22	22,22	21,11
3	26	9	20	6,18	25,77	2,41	20,04	25,16
4	32	9	20	6,14	31,3	5,40	24,88	22,94
5	26	6	30	4,03	19,61	2,10	12,77	25,75
6	32	6	30	3,48	23,72	3,09	14,26	18,80
7	26	9	30	5,59	21,84	2,24	13,13	30,31
8	32	9	30	4,04	27,49	3,8	17,42	18,26
9	29	7,5	25	4,80	24,24	3,6	16,09	23,43
10	29	7,5	25	4,75	24,15	3,68	16,15	24,06
11	29	7,5	25	4,9	24,45	3,84	16,23	22,45

Fonte: Autor

Diante dos resultados obtidos, foi feito o ajuste dos dados para obter um modelo linear que relacione as variáveis dependentes: reforço r(mm), largura L(mm), índice de convexidade $IC=r/L*100\%$, profundidade P(mm) e diluição (D%), com as variáveis independentes estudadas.

Os modelos estabelecidos para as variáveis dependentes estão representados pelas equações 16, 17, 18, 19 e 20, onde os coeficientes em negrito são os efeitos estatisticamente significativos ao nível de 95% de confiança.

$$r=4,8981-0,4112*U+0,558*Va-0,643*Vs+0,013*U*Va-0,113*U*Vs-0,028*Va*Vs-0,263*U*Va*Vs$$

Equação (16)

$$L=24,831-2,763*U+1,561*Va-1,873*Vs+0,031*U*Va-0,323*U*Vs-0,061*Va*Vs-0,353*U*Va*Vs$$

Equação (17)

$$IC=23,854-3,778*U+0,111*Va-0,775*Vs+0,211*U*Va-0,972*U*Vs+0,894*Va*Vs-1,487*U*Va*Vs$$

Equação (18)

$$P=3,249-0,800*U+0,385*Va-0,270*Vs+0,338*U*Va-0,163*U*Vs-0,173*Va*Vs-0,195*U*Va*Vs$$

Equação (19)

$$D\%=17,220-2,075*U+1,245*Va-3,226*Vs+0,207*U*Va-0,628*U*Vs-0,366*Va*Vs+0,490*U*Va*Vs$$

Equação (20)

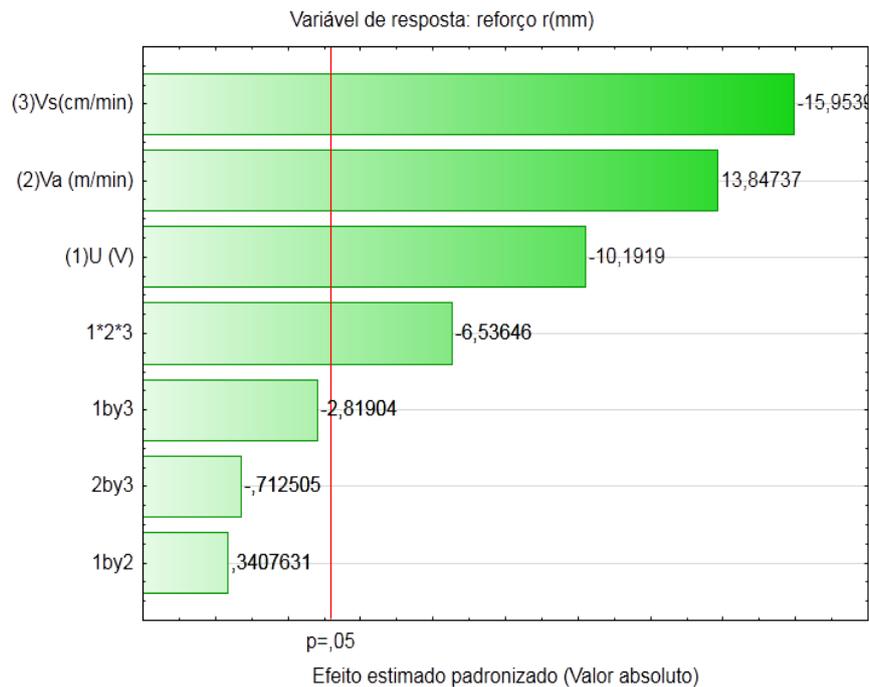
Onde: U = Tensão; Va= velocidade de alimentação, Vs= velocidade de soldagem e U*Va, U*Vs, Va*Vs e U*Va*Vs são as interações das variáveis.

5.2.1.1 Efeitos das variáveis do processo sobre o reforço (r)

Conforme resultados apresentados na Tabela 21, os valores de resposta para o reforço r (mm) foram superiores a 3 mm, variando 3,48 mm a 6,18 mm, o qual estão de acordo com a norma N-1707 (2011) da PETROBRAS que recomenda uma altura líquida de 3 mm.

Observa-se no diagrama de Pareto, Figura 53, que a velocidade de soldagem, V_s , é o efeito de maior importância para variável de resposta reforço, estando com valor na coluna negativo, significando então que a maior altura do reforço (r) é atingida para os menores valores da velocidade de soldagem. A velocidade de alimentação vem em segundo lugar como modelo de maior relevância, seguido da tensão e da interação $U*Va*Vs$.

Figura 53 - Diagrama de Pareto dos efeitos para variável reforço r (mm).

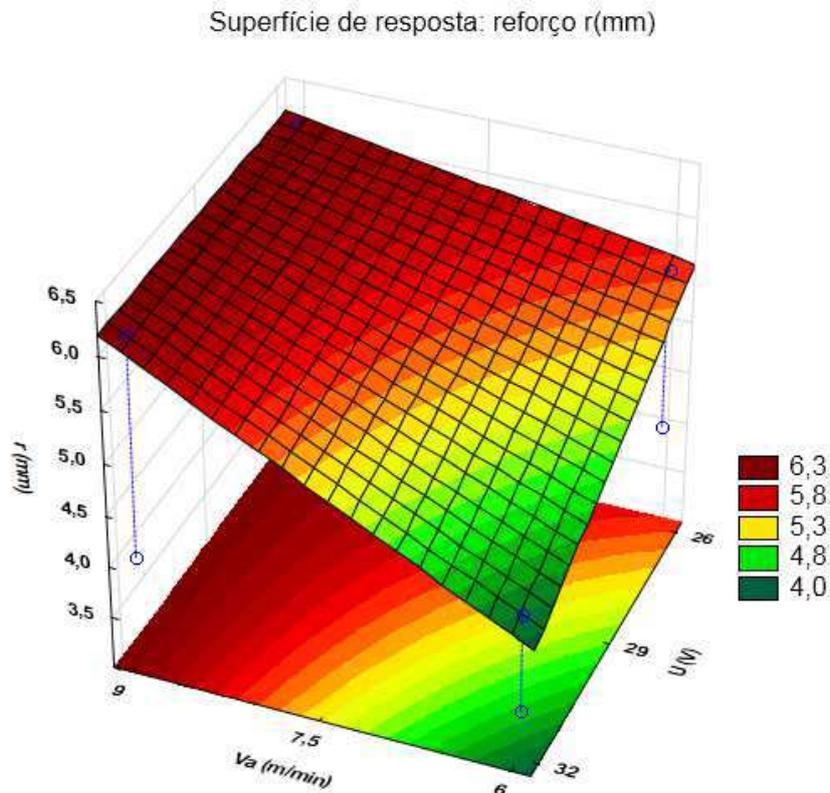


Fonte: Autor

Através das informações apresentadas, a superfície de resposta foi construída mantendo-se o valor da velocidade de soldagem fixa em 20 cm/min, variando os valores das variáveis: tensão, U, e velocidade de alimentação, Va.

A Figura 54 apresenta a superfície construída para o reforço r(mm). Nota-se que a máxima altura do reforço (6,3 mm) ocorre para valores de tensão 26 V e velocidade de alimentação 9 m/min. Este valor está próximo do valor experimental obtido no experimento 3, nas mesmas condições que é de 6,18 mm.

Figura 54 - Superfície de resposta do reforço sob a influência da Tensão versus Velocidade de alimentação, fixando-se a Velocidade de Soldagem 20 cm/min (-1).



Fonte: Autor

Portanto, os maiores valores encontrados foram para os experimentos com maiores velocidade de alimentação, menores velocidades de soldagem e menores valores da tensão. Isso se deve ao fato da maior quantidade de material depositado por minuto, através da alta taxa de deposição e menor velocidade de soldagem, como também ao fato da tensão baixa favorecer a cordões estreitos consequentemente com reforço mais elevado (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

Na Tabela 22 mostra os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 22 - Análise de variância para avaliação do reforço (r)

Fator	SQ	GL	MQ	F_{calculado}
Regressão	7,8341	7	1,12	85,92
Resíduo	0,0391	3	0,01303	
F.Ajuste	0,027409	1	0,02741	
Erro Puro	0,0117	2	0,00583	
Total	7,8732	10		
R²	99,5%			
F_{tabelado}	8,89		F_{calc}/ F_{tab}=	9,66

Fonte: Autor

Pode-se concluir, observando os dados da Tabela 22, que o modelo apresentado na Equação 16 tem coeficiente de determinação (R^2) igual a 99,5% das variações obtidas explicado pelo modelo, equação 16, e com um valor da razão de $F_{\text{calculado}}$ por F_{tabelado} de 9,66, indicando que o modelo é estatisticamente significativo com 95% de confiança devido ao da valor razão ser maior que um, como também ser útil para fins preditivos em consequência de ser maior que quatro (Barros Neto et al., 1996).

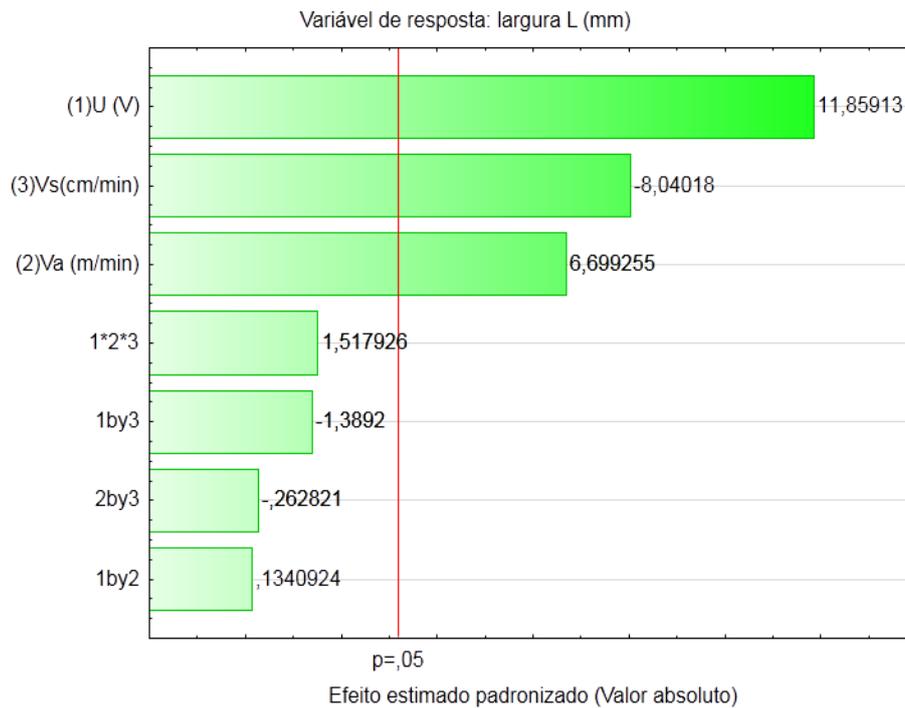
5.2.1.2 Efeitos das variáveis do processo sobre a largura (L)

Os resultados obtidos indicados na Tabela 21, para variável largura do revestimento observa-se que os valores variaram entre 19,61 mm a 31,3 mm.

Conforme os resultados apresentados na Figura 55, verifica-se que a Tensão, U, velocidade de alimentação, Va, e a velocidade de soldagem, Vs, mostraram influência estatisticamente significativos, enquanto que as interações das variáveis U*Va, U*Vs, Va*Vs e U*Va*Vs não apresentaram influência estatística significativa apesar de ter apresentado o coeficiente de determinação R^2 igual a 98,83%.

Portanto, como a tensão e velocidade de alimentação apresentaram valores positivo nas colunas, significando então que a maior largura (L) é atingida para os maiores valores da tensão e velocidade de alimentação. Por outro lado, o valor negativo apresentado no gráfico na coluna da velocidade de soldagem, indica que largura máxima do revestimento é atingida em menores velocidades de soldagem.

Figura 55 - Diagrama de Pareto dos efeitos para variável largura L (mm).

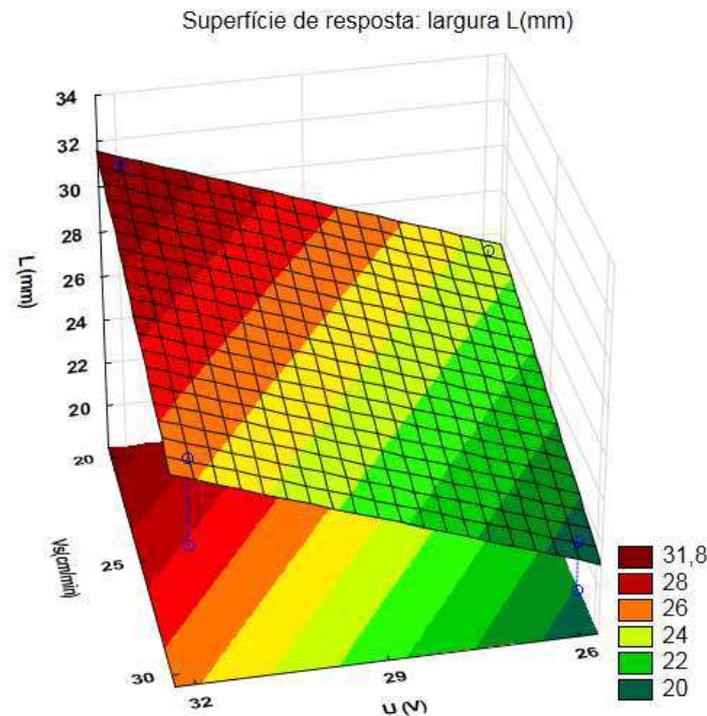


Fonte: Autor

Assim, foi construída a superfície de resposta mantendo-se a velocidade de alimentação em 9 m/min, variando os valores das variáveis tensão e velocidade de soldagem.

A superfície de resposta representada na Figura 56 mostra que a máxima largura (L) (31,8 mm) é atingida para valores de tensão de 32 V e velocidade de soldagem de 20 cm/min. Este valor está próximo do valor experimental obtido no experimento 6, nas mesmas condições que é de 31,3 mm.

Figura 56 - Superfície de resposta da Largura sob a influência da Tensão versus Velocidade de soldagem, fixando-se a Velocidade de alimentação 9 m/min (+1).



Fonte: Autor

Resultados mostram que os maiores valores da largura (L) são alcançados para os maiores valores de tensão, menores velocidades de soldagem e maior velocidade de alimentação.

Os maiores valores da tensão se deve ao fato do maior comprimento do arco, resultar em uma coluna de plasma mais ampla em sua extensão proporcionando uma maior largura. Já para os menores valores velocidade de soldagem promove um aumento na quantidade de material por unidade de comprimento. Por fim, a maior velocidade de alimentação influencia na largura devido ao aumento da taxa de deposição, ou seja, maiores taxas resultam em maior quantidade material depositado (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

Na Tabela 23 constam os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 23 - Análise de variância para avaliação da largura (L)

Fator	SQ	GL	MQ	$F_{\text{calculado}}$
Regressão	110,5715	7	15,80	36,35
Resíduo	1,3035	3	0,43449	
F.Ajuste	1,25607	1	1,25608	
Erro Puro	0,0474	2	0,02370	
Total	111,8750	10		
R^2	98,83%			
F_{tabelado}	8,89		$F_{\text{calc}}/ F_{\text{tab}}=$	4,09

Fonte: Autor

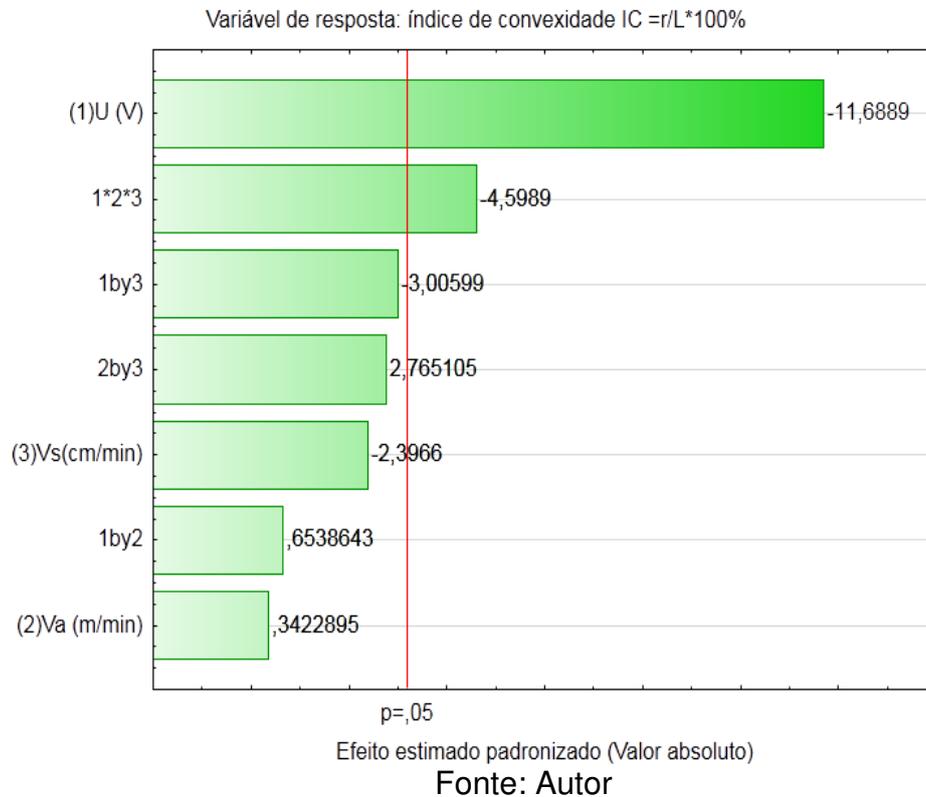
Portanto, de acordo com os resultado mostrados na Tabela 23, o modelo apresentado na Equação 17 tem coeficiente de determinação (R^2) igual a 98,83% das variações obtidas explicado pelo modelo, equação 17, e com um valor da razão de $F_{\text{calculado}}$ por F_{tabelado} de 4,09, indicando que o modelo é estatisticamente significativo com 95% de confiança devido ao valor da razão ser maior que um, com fins preditivos por apresentar valor da razão maior que quatro (Barros Neto et al., 1996).

5.2.1.3 Efeitos das variáveis do processo sobre o índice de convexidade (IC)

Os valores do índice de convexidade $IC=100*r/L$ apresentados na Tabela 21, mostram uma variação de 18,26% a 30,31 %.

A Figura 57 mostra que a tensão, U, e a interação U*Va*Vs, mostraram influência estatística significativa, enquanto que as demais variáveis e as interações entre elas não apresentaram influência estatística significativa. Entretanto apresentou o coeficiente de determinação R^2 igual a 98,36%.

Figura 57 - Diagrama de Pareto dos efeitos para variável do índice de convexidade (IC)

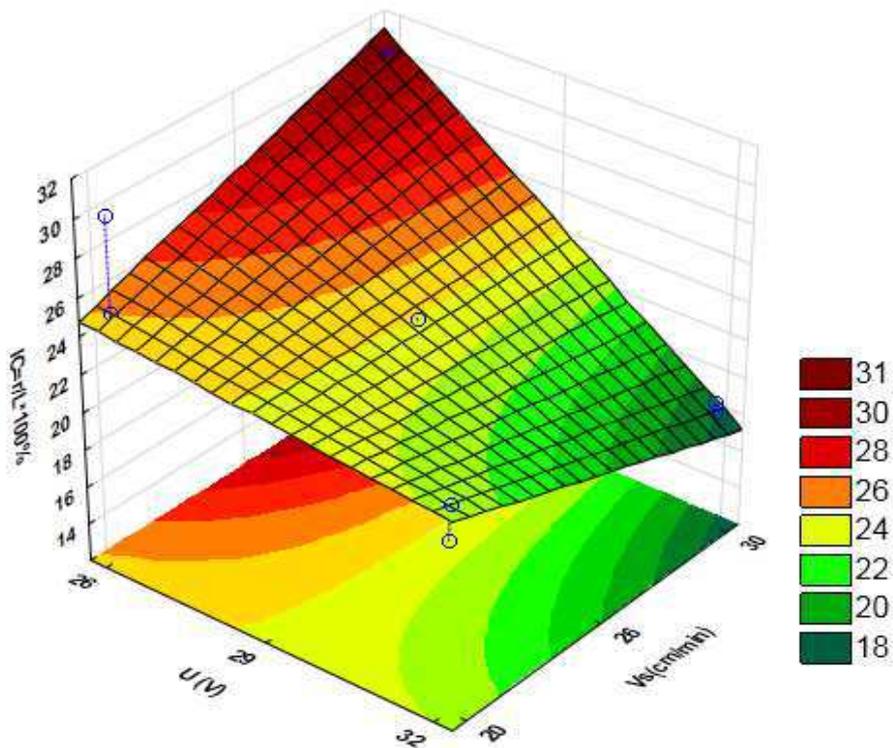


Com base nestas informações apresentadas, foi construída a superfície de resposta mantendo-se a velocidade de alimentação em 9 m/min, variando os valores das variáveis tensões e da velocidade de soldagem.

A Figura 58 representada para do índice de convexidade ($IC=r/l*100\%$) do revestimento, nota-se que o valor de 31% é obtido com valores de tensão 26 V e velocidade de soldagem de 20 cm/min. Este valor está próximo do valor experimental obtido no experimento 7 nas mesmas condições que é de 30,31 %.

Figura 58 - Superfície de resposta do índice de convexidade sob a influência da Tensão versus Velocidade de soldagem, fixando-se a Velocidade de alimentação 9 m/min (+1).

Superfície de resposta: índice de convexidade $IC=r/L*100\%$



Fonte: Autor

Os resultados obtidos para o índice de convexidade estão de acordo com a literatura (SILVA, 2000) a qual estabelece que valores próximos de 30 % representam condições desejáveis para a relação largura (L) e reforço de cordão (r). Já para (COSTA & RIBEIRO, 2001), informa que o índice de convexidade deve sempre ser inferior a 30%, como critério de qualidade.

Na Tabela 24 mostra os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 24 - Análise de variância para avaliação do índice de convexidade (IC)

Fator	SQ	GL	MQ	F_{calculado}
Regressão	151,0802	7	21,58288	25,82
Resíduo	2,5075	3	0,83585	
F.Ajuste	1,200424	1	1,20042	
Erro Puro	1,3071	2	0,65356	
Total	153,5877	10		
R²	98,36%			
F_{tabelado}	8,89		F_{calc}/ F_{tab}=	2,90

Fonte: Autor

Portanto, baseado nos dados da Tabela 24, o modelo apresentado na Equação 18 tem coeficiente de determinação (R^2) igual a 98,36 % das variações obtidas, apresentando um valor da razão de $F_{\text{calculado}}$ por F_{tabelado} de 2,90, indicando que o modelo é estatisticamente significativo com 95% de confiança (Barros Neto et al., 1996).

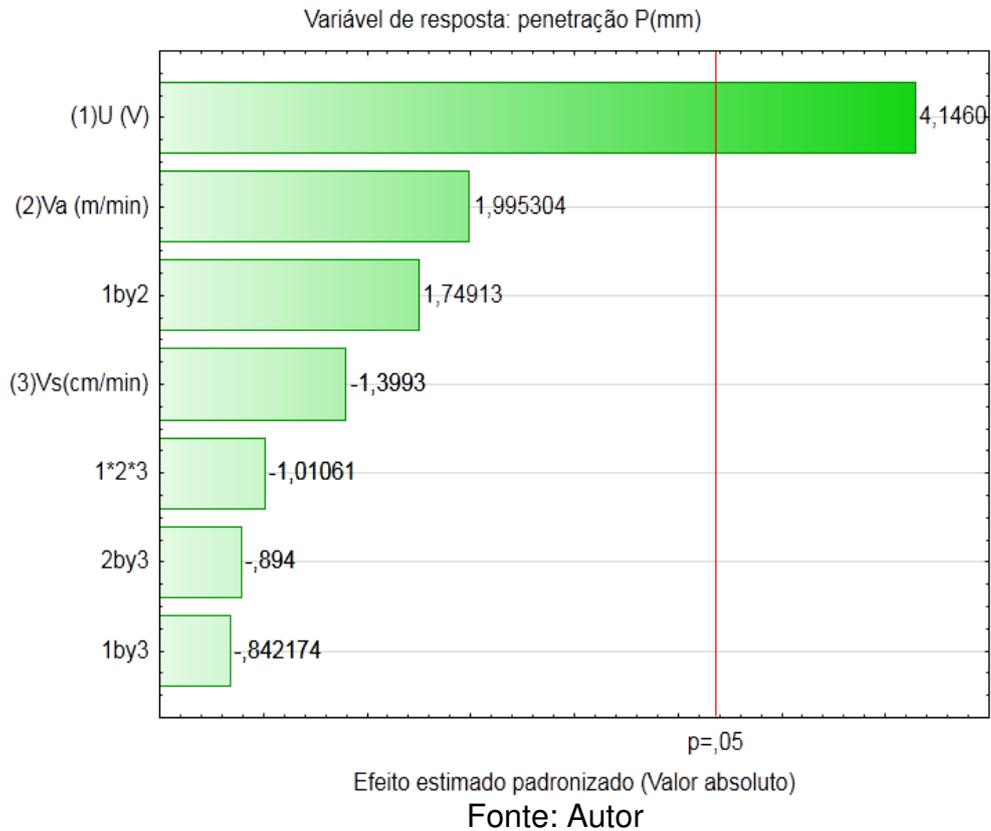
5.2.1.4 Efeitos das variáveis do processo sobre a penetração (P)

Conforme os valores mostrados na Tabela 21 para variável de resposta penetração P(mm), nota-se uma variação de 2,10 mm a 5,40 mm nos resultados encontrados.

A Figura 59 indica que a tensão, U, apresentou influência estatística significativa, enquanto que as demais variáveis e as interações das variáveis não apresentaram influência, apresentando o coeficiente de determinação R^2 igual a 97,3%.

O valor positivo na coluna da tensão do diagrama de Pareto, indica que à medida que a tensão aumenta, ocorre um aumento na penetração no revestimento.

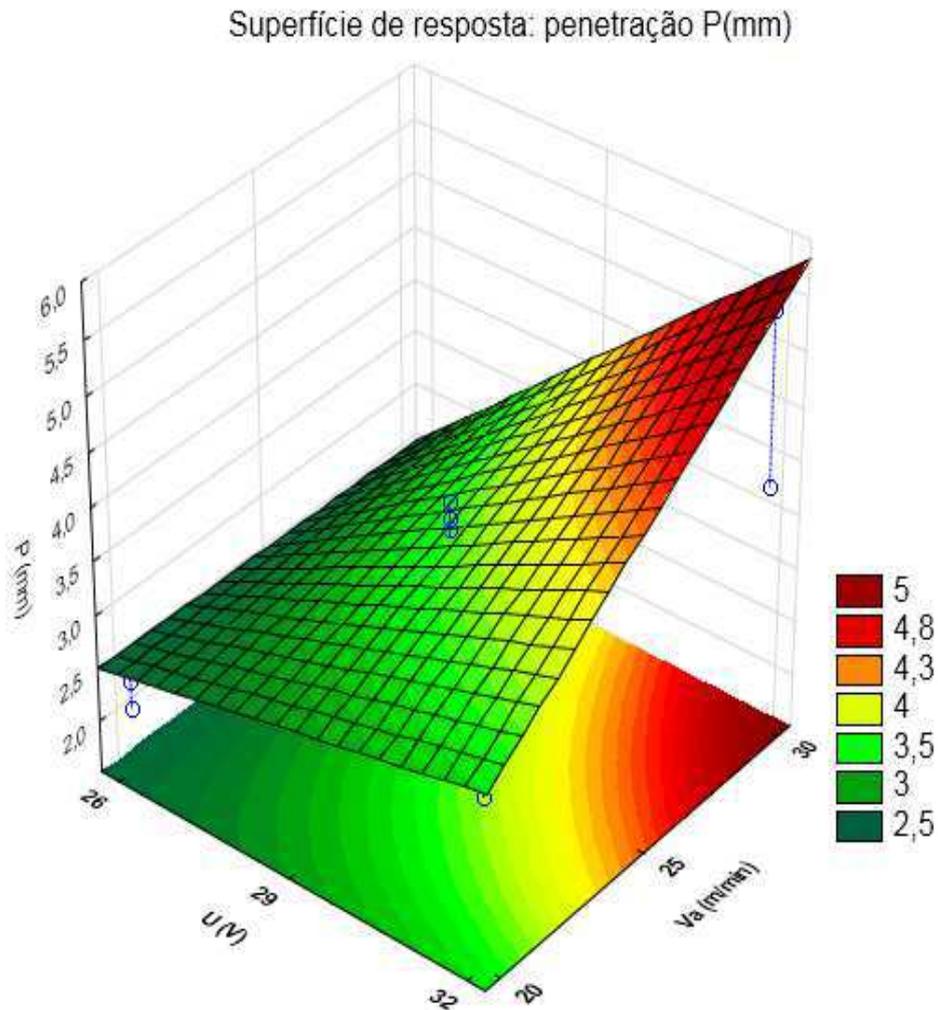
Figura 59 - Diagrama de Pareto dos efeitos para variável penetração P(mm).



Diante das informações apresentadas, foi construída a superfície de resposta mantendo-se a velocidade de soldagem igual a 20 cm/min, variando os valores da tensão e da velocidade de alimentação.

A Figura 60 mostra que a menor penetração (2,50 mm) atingida nos revestimentos foi para os valores de tensão igual a 26 V e velocidade de alimentação 6 m/min. Este valor está próximo do valor experimental obtido no experimento 3 nas mesmas condições que é de 2, 10 mm.

Figura 60 - Superfície de resposta da penetração sob a influência da Tensão versus Velocidade de alimentação, fixando-se a Velocidade de soldagem 20 cm/min (-1).



Fonte: Autor

Portanto, a menor penetração é atingida para menores valores de tensão e velocidade de alimentação. Tensões excessivas e velocidade de alimentação alta promove um cordão na forma de chapéu, mais estreito e com maior profundidade (FORTES, 2004).

Na Tabela 25 mostra os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 25 - Análise de variância para avaliação da penetração (P)

Fator	SQ	GL	MQ	F_{calculado}
Regressão	211,12	7	30,16	15,5
Resíduo	5,83	3	1,94	
F.Ajuste	5,79	1	2,20	
Erro Puro	0,0434	2	0,764	
Total	216,95	10		
R²	97,3 %			
F_{tabelado}	8,89		F_{calc}/ F_{tab}=	1,75

Fonte: Autor

Portanto, os dados da Tabela 25, informa o modelo apresentado na Equação 19 tem coeficiente de determinação (R^2) igual a 97,3% das variações obtidas explicado pelo modelo, equação 19, e com um valor da razão de $F_{calculado}$ por $F_{tabelado}$ igual a 15,5 indicando que o modelo é estatisticamente significativo com 95% de confiança (Barros Neto et al., 1996).

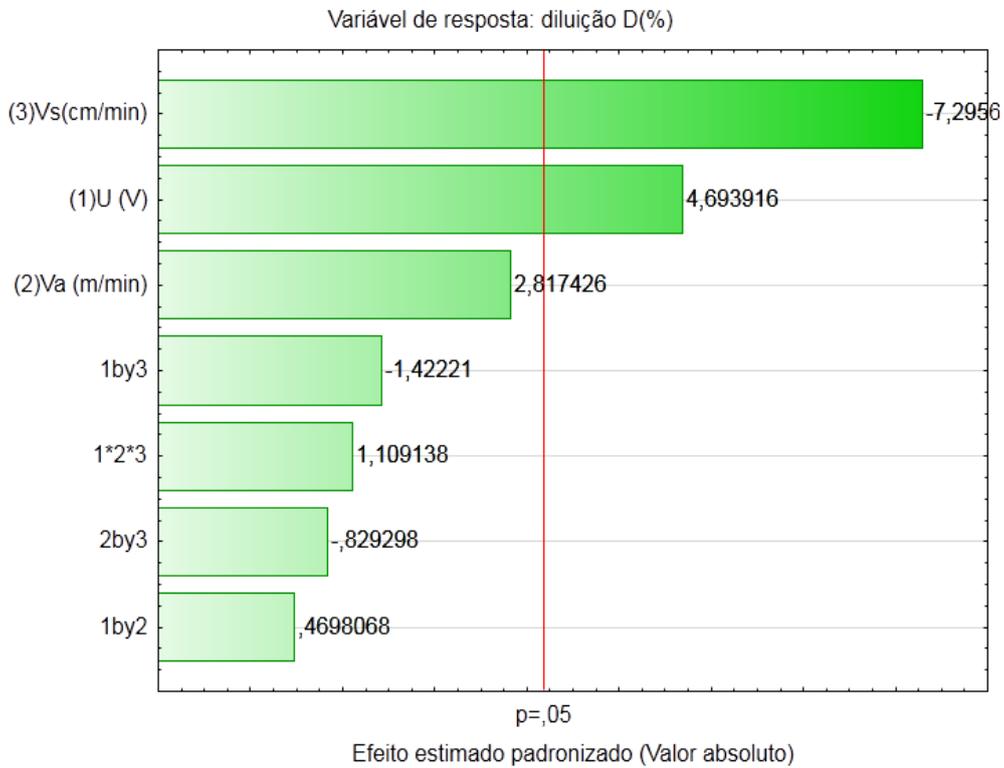
5.2.1.5 Efeitos das variáveis do processo sobre a diluição (D%)

A Tabela 21 apresenta os resultados referentes à variável diluição D(%), a qual variou de 12,77% a 24,88%.

Analisando os resultados apresentados na Figura 61, verifica-se que a, velocidade de soldagem, V_s e a tensão, U, mostraram influência estatística significativa, enquanto que a velocidade de alimentação e as interações das variáveis não apresentaram influência estatística significativa. Entretanto apresentou o coeficiente de determinação R^2 igual a 96,68%.

O valor negativo na coluna da velocidade de soldagem do diagrama de Pareto, que indica à medida que a velocidade de soldagem diminui a diluição aumenta. Já para a tensão o sinal positivo da coluna indica que a medida tensão aumenta a diluição também aumenta.

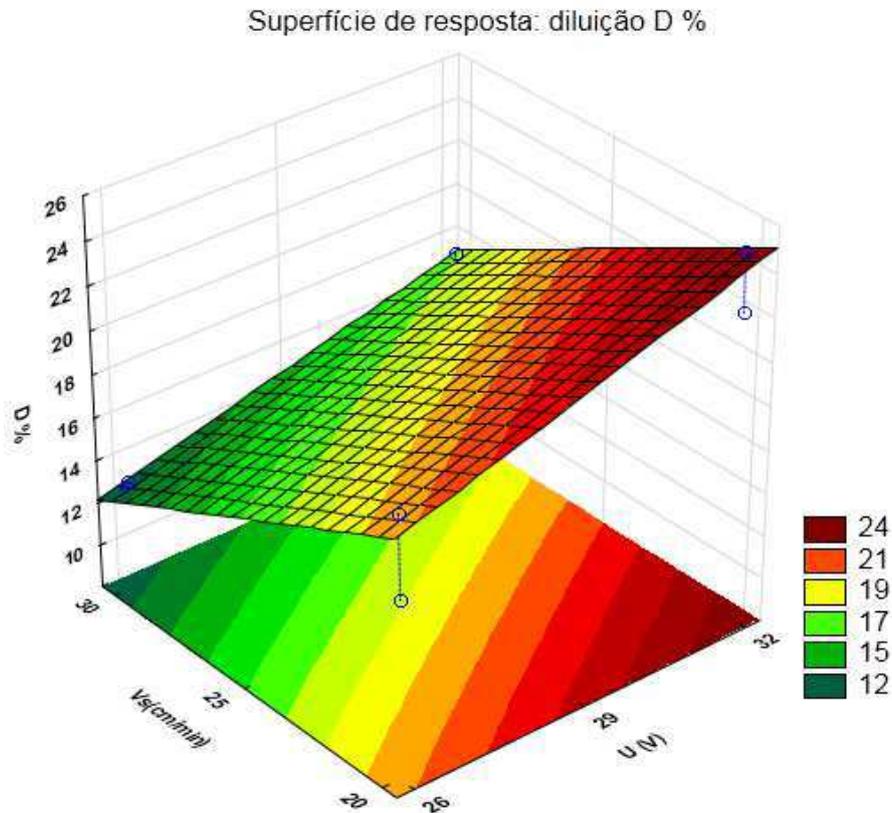
Figura 61 - Diagrama de Pareto dos efeitos para variável diluição D %.



Fonte: Autor

A partir da análise estatística dos resultados para a variável diluição (%) foi gerada a superfície de resposta, ver Figura 62, a qual observa-se que o menor percentual da diluição (12 %) ocorre para os valores da velocidade de soldagem de 30 cm/min e tensão de 26 V. Estando esse valor próximo do valor experimental obtido no experimento 5 nas mesmas condições que é de 12,77 %.

Figura 62 - Superfície de resposta da diluição sob a influência da Tensão versus Velocidade de soldagem, fixando-se a Velocidade de alimentação 9 m/min (+1).



Fonte: Autor

De acordo com os resultados apresentados na Figura 62, com relação à velocidade de soldagem e a tensão do arco, os resultados mostram que a medida que aumenta a velocidade de soldagem e diminuí a tensão ocorre a diminuição na diluição Isto se deve ao fato da velocidade ser inversamente e a tensão ser diretamente proporcional a energia de soldagem, proporcionando uma menor quantidade de calor imposto no substrato, e promovendo uma maior redução na área de metal depositado (KEJELIN et al., 2007; PESSOA, 2009).

Na Tabela 26 apresenta os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 26 - Análise de variância para avaliação da Diluição D(%)

Fator	SQ	GL	MQ	F_{calculado}
Regressão	136,6583	7	19,52261	12,48
Resíduo	4,6930	3	1,56434	
F.Ajuste	4,682813	1	4,68281	
Erro Puro	0,0102	2	0,00510	
Total	141,3513	10		
R²	99,31%			
F_{tabelado}	8,89		F_{calc}/ F_{tab}=	1,40

Fonte: Autor

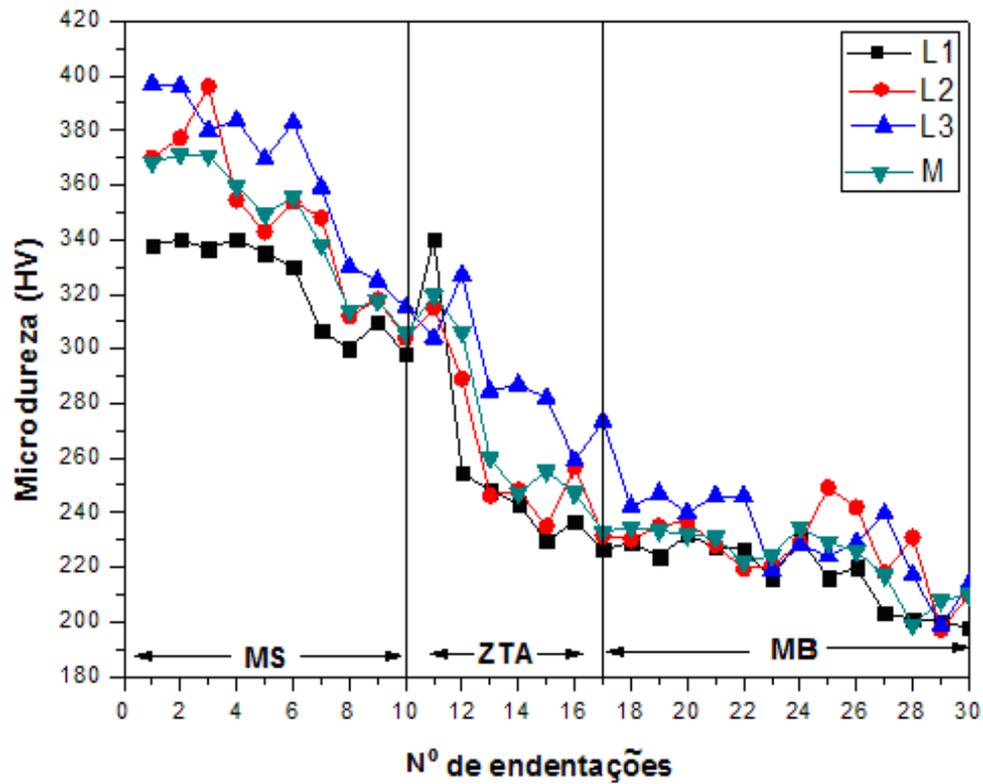
Os dados da Tabela 26, informa que o modelo apresentado na Equação 20 tem coeficiente de determinação (R^2) igual a 96,68% das variações obtidas explicado pelo modelo, equação 20, e com um valor da razão de $F_{calculado}$ por $F_{tabelado}$ igual a 12,48, indicando que o modelo é estatisticamente significativo com 95% de confiança (Barros Neto et al., 1996).

5.2.2 Análise Metalográfica dos revestimentos por MIG

5.2.2.1 Microdureza

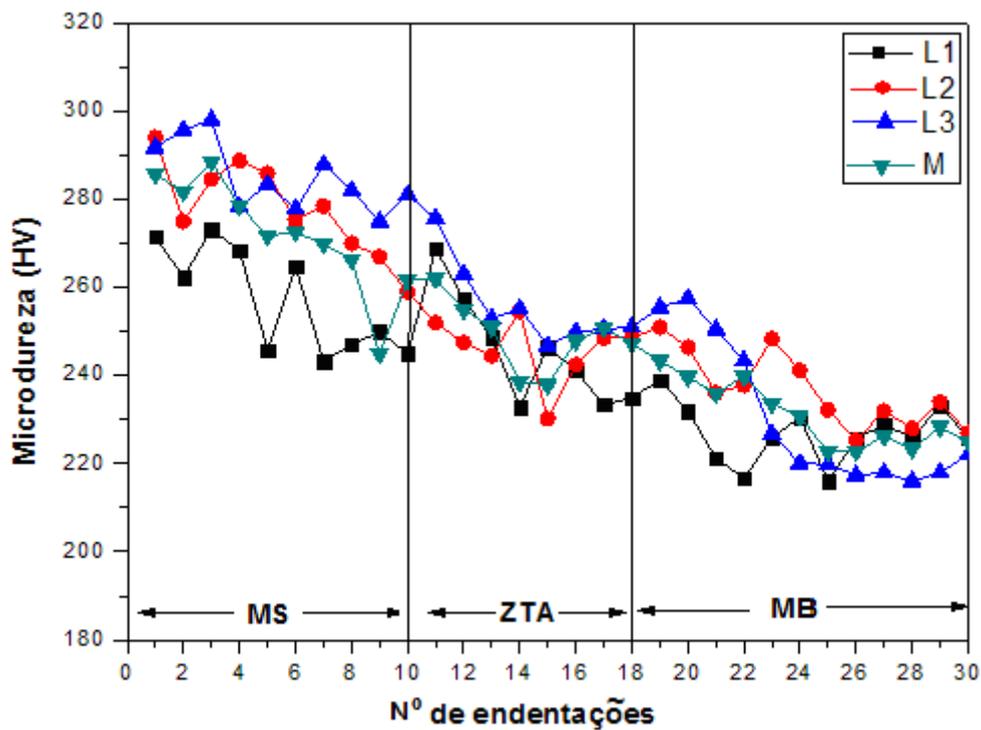
Os gráficos das Figuras 63 e 64 mostram o perfil de microdurezas ao longo das regiões MS, ZTA e MB, para os experimentos 4 e 5, onde nota-se o comportamento semelhante nas regiões, ou seja, o MS apresenta um nível de microdureza superior ao da ZTA. Em termos de valores médios, para a $H = 18,99$ J/cm as microdurezas do MS e ZTA foram, respectivamente, $(270,93 \pm 10,69)$ HV e $(255,35 \pm 8,18)$ HV e para $H = 8,34$ J/cm, as microdurezas do MS e ZTA foram, $(349,99 \pm 20,93)$ HV e $(268,86 \pm 8,04)$ HV respectivamente. O MB apresentou uma microdureza de $(228,85 \pm 4,94)$ HV e $(226,36 \pm 3,59)$.

Figura 63 - Microdureza ao longo das linhas verticais para $H = 8,34 \text{ kJ/cm}$.
Experimento 5 - MIG.



Fonte: Autor

Figura 64 - Microdureza ao longo das linhas verticais para $H = 18,99 \text{ KJ/cm}$.
Experimento 4 -MIG.



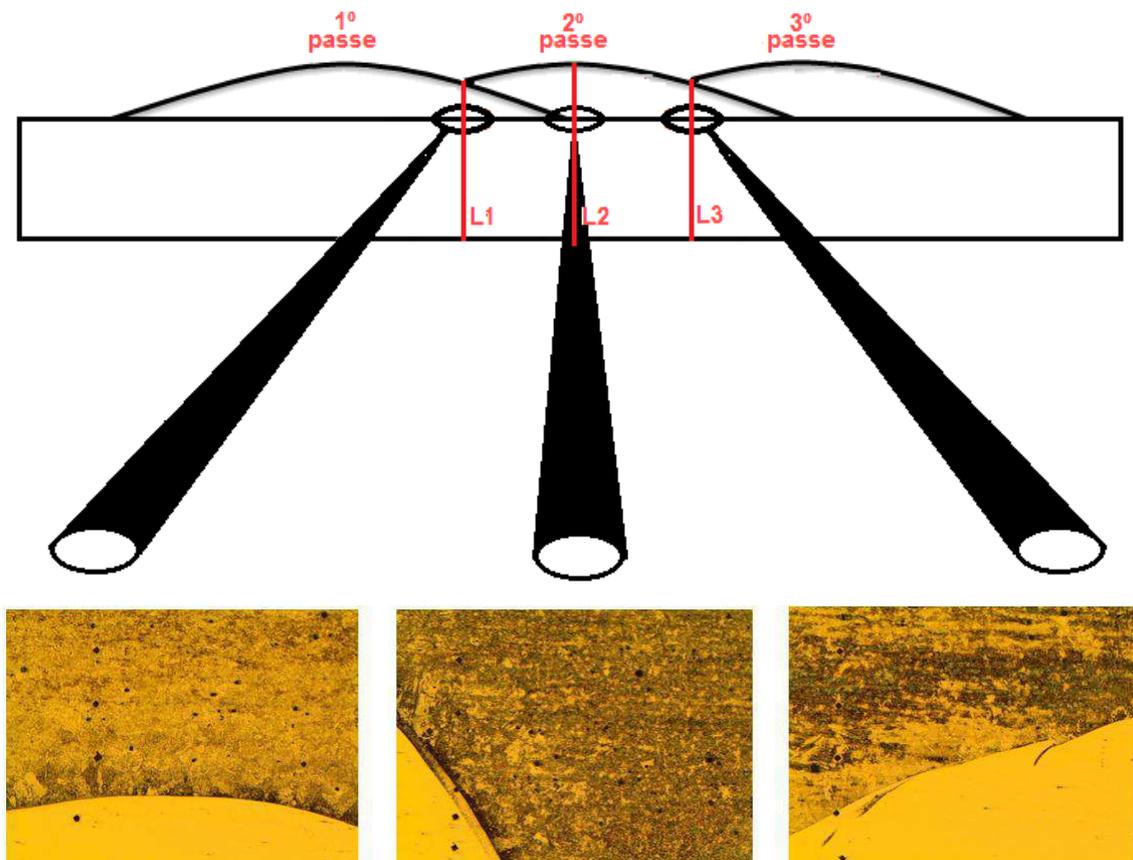
Fonte: Autor

Os resultados mostram um aumento de 13,51 HV no valor médio da microdureza da ZTA ao reduzir a energia de soldagem de $H= 18,99$ KJ/cm para $H=8,34$ kJ/cm. Energias de soldagem mais baixas resultam em taxas de resfriamento mais elevadas e, conseqüentemente, uma microdureza mais elevada na ZTA. KEJELIN et al (2006) obtiveram um aumento de 20HV na microdureza da ZTA quando reduziram a energia de soldagem de 1500KJ/cm para 1100kJ/cm. Este fato pode ser explicado em função da variação na taxa de resfriamento e, conseqüentemente, nos níveis de microdureza da ZTA.

5.2.2.2 Microestrutura

A ilustração da Figura 65 apresenta uma pequena variação de microestrutura ao longo da interface do revestimento nos experimentos 4 com energia $H=18,99$ KJ/cm. A região da ZTA no 2º passe (linha 2), ou seja, parte central do revestimento apresentou uma microestrutura mais refinada com grãos menores que as regiões entre passes, apresentando menores valores de microdureza. Esse fato é devido à influência da energia de soldagem do 2º passe depositado sobre o 1º passe do revestimento e 3º passe depositado sobre o 2º passe do revestimento. Isto também é influenciado pelo valor da sobreposição utilizada, 1/2, visto que (BATISTA, 2011) ao usar uma sobreposição de 1/3 verificou resultado contrário, ou seja, maior refinamento nas regiões entre passes devido à linha de intersecção está mais distante do centro do revestimento, então o efeito da energia de soldagem não foi intenso na região central de tal forma que não surtiu efeito tão significativo para refinamento.

Figura 65 - Variação de microestrutura ao longo da interface MS/Substrato
Experimento 4 - MIG (H=18,99 KJ/cm).

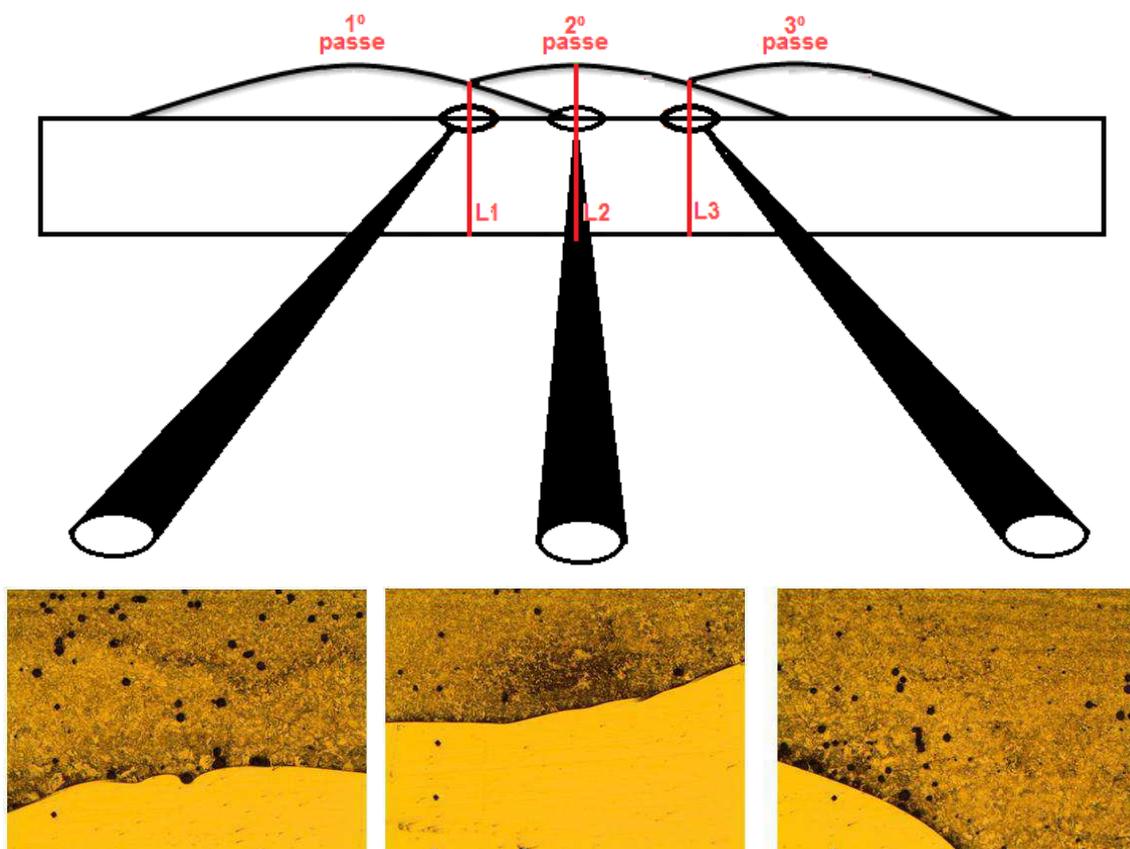


Fonte: Autor

Nas regiões entre os passes de revestimento (interseção), Linha L1 e L3 apresentaram uma microestrutura um pouco menos refinada, confirmando assim os maiores valores de microdureza apresentados.

Analogamente aos revestimentos depositados com energia de soldagem $H= 18,99$ KJ/cm, também houve refinamento de grãos da ZTA na região central, linha L2. Isto pode ser verificado na micrografia da Figura 66. Este refino certamente influencia nos valores de microdureza e conseqüentemente reduz a fragilidade nesta região.

Figura 66 - Variação de microestrutura ao longo da interface MS/Substrato
Experimento 5 - MIG ($H=8,34$ KJ/cm).



Fonte: Autor

5.2.3 Avaliação da Corrosão dos Revestimentos depositados por MIG

Utilizou-se o planejamento fatorial completo de 2^3 , com 8 experimentos e 3 pontos centrais para analisar os efeitos das variáveis independentes, Tensão (U), velocidade de alimentação (V_a) e velocidade de soldagem (V_s) com relação as variáveis dependentes, Resistência à polarização (R_p) e Potencial de Corrosão (E_{corr}), através da técnica de Polarização Potenciodinâmica linear, conforme resultados apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 - Matriz de planejamento e Resultados da avaliação da resistência a corrosão.

Experimento	Variáveis Independentes			Variáveis dependentes				
	U (V)	Va (m/min)	Vs (cm/min)	R _p (KΩ)	E _{corr} (V)	% Fe	D%	H (KJ/cm)
1	26	6	20	247,87	-0,2834	5,819	16,25	12,40
2	32	6	20	333,01	-0,2285	7,283	22,22	16,96
3	26	9	20	304,45	-0,2557	10,563	20,04	15,29
4	32	9	20	375,56	-0,2124	17,741	24,88	18,99
5	26	6	30	130,85	-0,3447	5,541	12,77	8,34
6	32	6	30	214,34	-0,3013	8,531	14,26	10,89
7	26	9	30	199,24	-0,3257	7,091	13,13	10,02
8	32	9	30	263,97	-0,2451	8,005	17,42	13,30
9	29	7,5	25	241,77	-0,2778	8,687	16,09	14,12
10	29	7,5	25	243,12	-0,2755	9,009	16,15	14,17
11	29	7,5	25	243,98	-0,2746	8,726	16,23	14,24

Fonte: Autor

Diante dos resultados experimentais obtidos, ajustou-se os dados para obter um modelo linear que relacione as variáveis dependentes: Resistência à polarização (R_p), Potencial de Corrosão (E_{corr}), com as variáveis independentes estudadas.

As equações 21 e 22 representam os modelos estabelecidos para as variáveis dependentes, onde os coeficientes em negrito são os efeitos estatisticamente significativos ao nível de 95% de confiança.

$$R_p = 254,37 - 38,05 \cdot U + 27,14 \cdot Va - 56,56 \cdot Vs - 4,098 \cdot U \cdot Va - 1,00 \cdot U \cdot Vs - 2,36 \cdot Va \cdot Vs - 0,591 \cdot U \cdot Vs \cdot Tx$$

Equação (21)

$$E_{corr} = -0,274 + 0,0277 \cdot U - 0,014 \cdot Va - 0,029 \cdot Vs - 0,0031 \cdot U \cdot Va + 0,0032 \cdot U \cdot Vs + 0,0039 \cdot Va \cdot Vs + 0,006 \cdot U \cdot Va \cdot Vs$$

Equação (22)

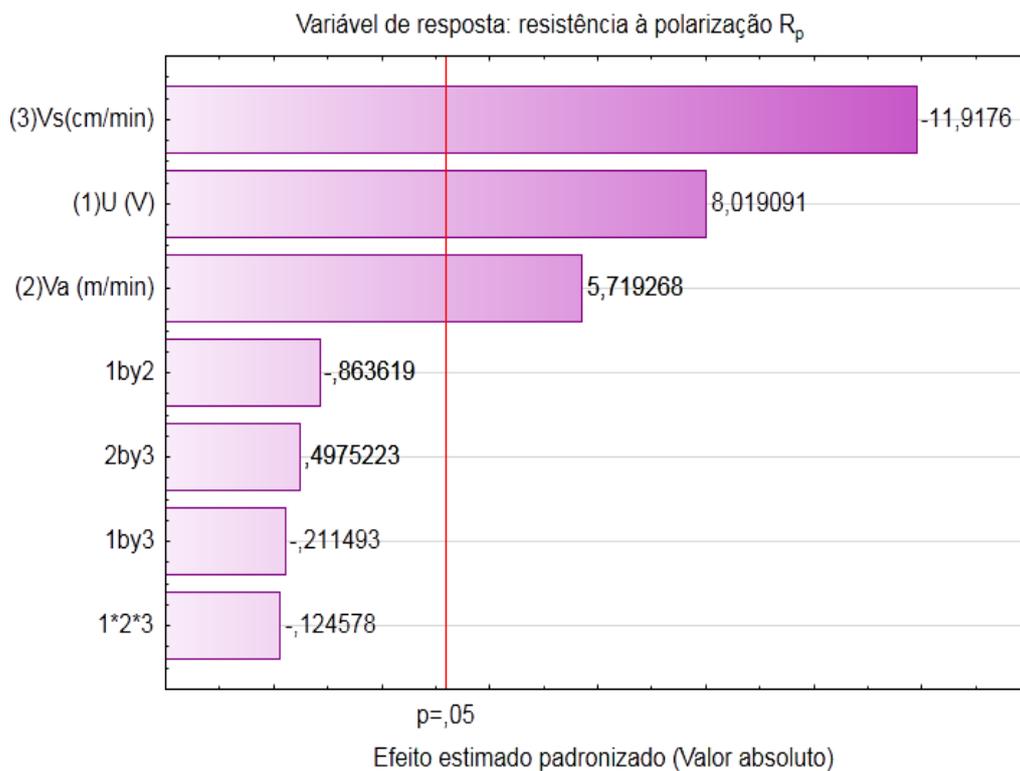
Onde: U = Tensão; Va= velocidade de alimentação, Vs= velocidade de soldagem e U*Va, U*Vs, Va*Vs e U*Va*Vs são as interações das variáveis.

5.2.3.1 Efeitos das variáveis sobre a resistência à polarização (R_p)

Observa-se os resultados apresentados na Tabela 27 que os valores da Resistência à polarização (R_p) variaram de 130,85 K Ω a 375,56 K Ω .

Através do diagrama de Pareto da Figura 67, observa-se que a tensão, U, velocidade de alimentação, V_a e a velocidade de soldagem, V_s , apresentaram influência significativa na variável de resposta resistência à polarização, R_p , sendo a velocidade soldagem a com maior efeito. Estando com o sinal negativo da coluna do gráfico, onde indica que a maior resistência a polarização é atingida para menores valores da velocidade de soldagem.

Figura 67 - Diagrama de Pareto dos efeitos para resistência a polarização.

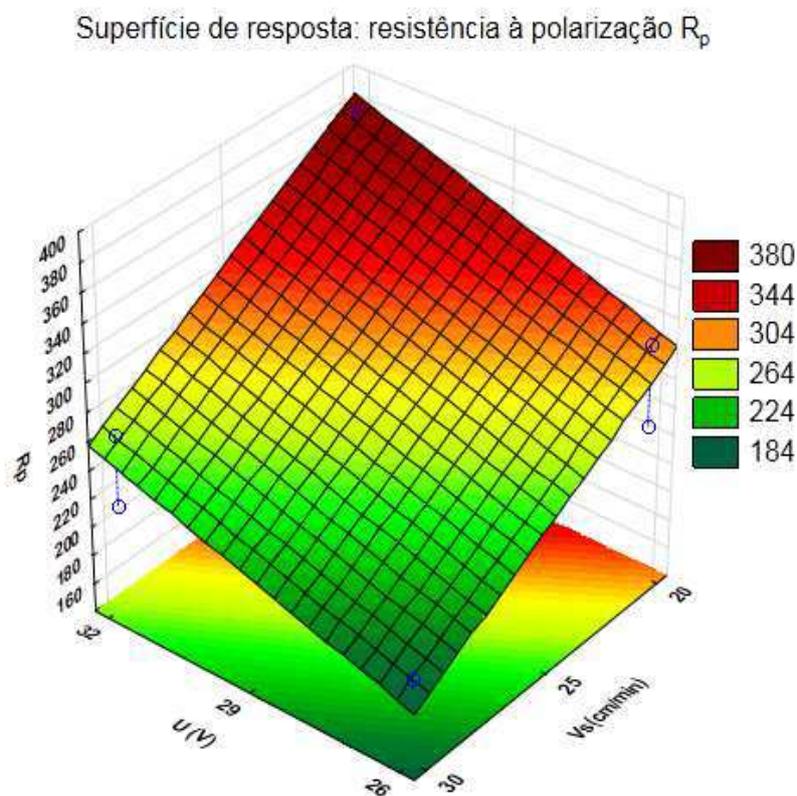


Fonte: Autor.

Diante das informações apresentadas, foi construída a superfície de resposta mantendo-se a velocidade de alimentação de 9 m/min, variando os valores da tensão no intervalo de 26 V a 32 V e a velocidade soldagem variando no intervalo de 20 cm/min a 30 cm/min.

A Figura 68 mostra o efeito dos valores da velocidade de soldagem e da tensão em função da resistência polarização dos revestimentos. Pode-se observar que com a elevação da velocidade de soldagem e diminuição da tensão, ocorre o aumento das propriedades anti-corrosivas (resistência à polarização), atingindo um valor máximo aproximadamente de 380 K Ω . Este valor está próximo do valor experimental obtido no experimento 4 nas mesmas condições que é de 375,56 K Ω .

Figura 68 - Superfície de resposta da resistência à polarização sob a influência da Tensão versus Velocidade de soldagem, fixando-se a Velocidade de Alimentação 9 m/min (+1).



Fonte: Autor.

Na Tabela 28 apresenta os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 28- Análise de variância para avaliação da Resistência à Polarização Rp.

Fator	SQ	GL	MQ	F_{calculado}
Regressão	43265,27	7	6180,75	34,30
Resíduo	540,59	3	180,19	
F.Ajuste	538,11	1	538,11	
Erro Puro	2,48	2	1,24	
Total	43805,86	10		
R²	98,76%			
F_{tabelado}	8,89		F_{calc}/ F_{tab}=	3,86

Fonte: Autor

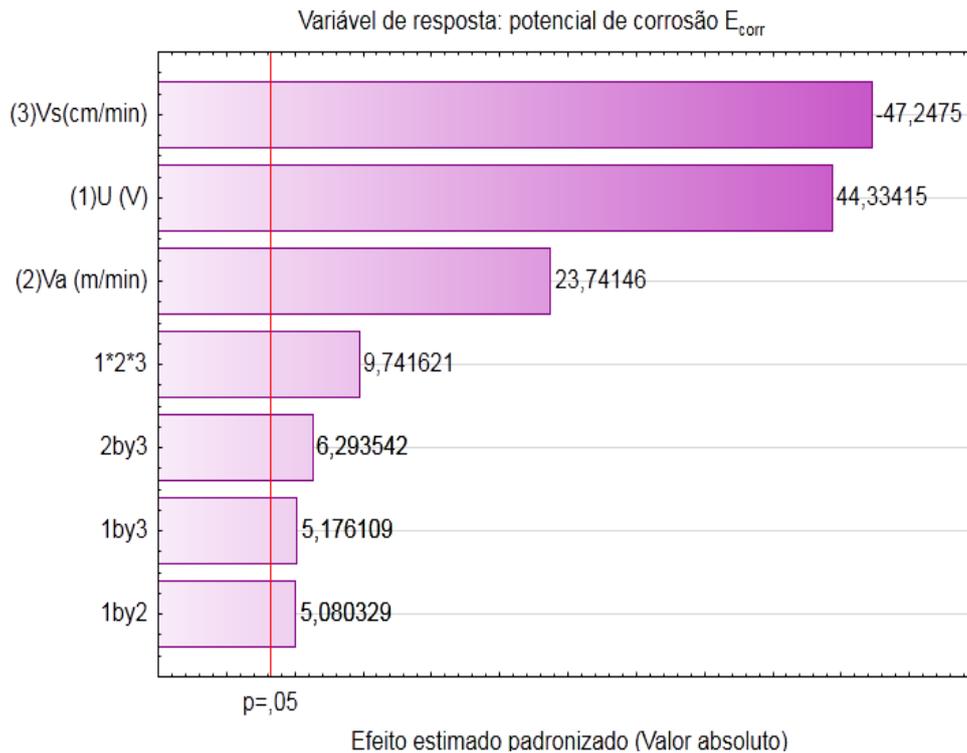
Portanto os dados da Tabela 28 informam que o modelo apresentado na Equação 21 tem coeficiente de determinação (R^2) igual a 98,76 % das variações obtidas explicado pelo modelo, com valor da razão de $F_{calculado}$ por $F_{tabelado}$ igual a 3,86 indicando que o modelo é estatisticamente significativo com 95% de confiança (Barros Neto et al., 1996).

5.2.3.2 Efeitos das variáveis sobre o potencial de polarização (E_{corr})

Os resultados apresentados na Tabela 27 para os valores do Potencial de corrosão, E_{corr} , variaram de -0,3447 V a -0,2124 V.

Observou-se na Figura 69, que a tensão, U, velocidade de alimentação, Va e a velocidade de soldagem, Vs, apresentaram influência significativa na variável de resposta, sendo a velocidade de soldagem com maior influência no potencial de corrosão, E_{corr} , estando com valor negativo na coluna do diagrama, indicando que o E_{corr} aumenta com a diminuição da velocidade de soldagem. Por outro lado, a tensão e velocidade de alimentação estando com o valor positivo na coluna do diagrama, indicam que o valor de E_{corr} aumenta com a elevação da tensão e da velocidade de alimentação.

Figura 69 - Diagrama de Pareto dos efeitos para potencial de corrosão

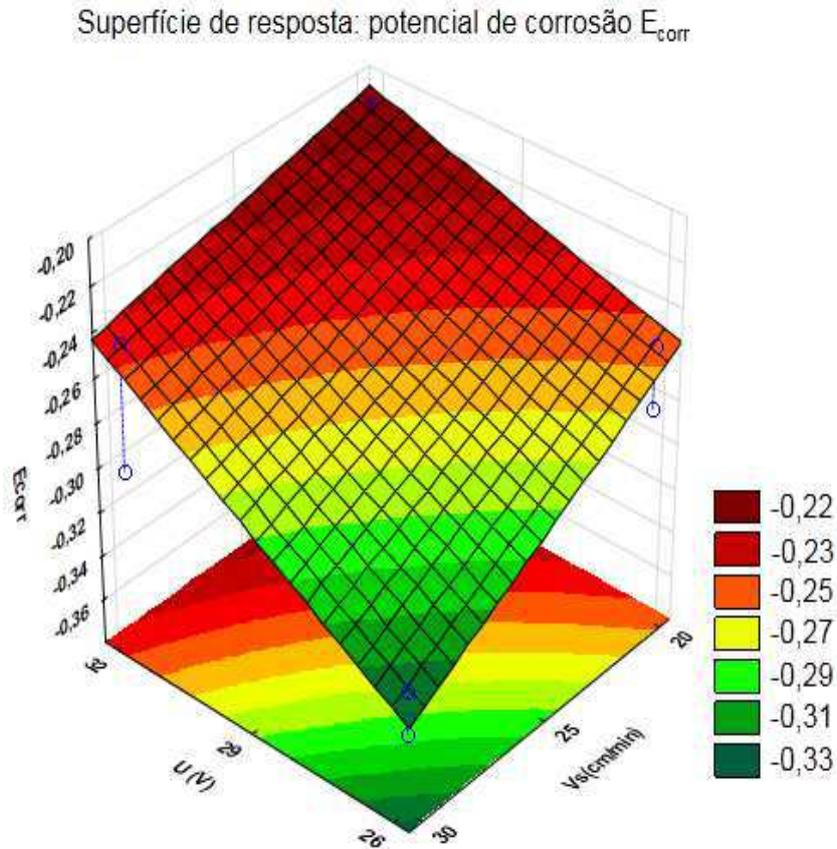


Fonte: Autor.

Com as informações apresentadas, foi construída a superfície de resposta mantendo-se a velocidade alimentação de 9 m/min, variando os valores da velocidade soldagem variando no intervalo de 20 cm/min a 30 cm/min e a Tensão no intervalo de 26 V a 32 V

A Figura 70 mostra o efeito dos valores da velocidade soldagem e da tensão em função do potencial de corrosão dos revestimentos. Assim observou-se que a diminuição da velocidade de soldagem e elevação da tensão ocorre o aumento no valor do E_{corr} atingindo um valor máximo aproximadamente de -0,210 V. Este valor está próximo do valor experimental obtido no experimento 4 nas mesmas condições que é de - 0,212 V.

Figura 70 - Superfície de resposta do Potencial de Corrosão, E_{corr} , sob a influência da velocidade de soldagem versus tensão, fixando-se a velocidade de alimentação 9 m/min (+1).



Fonte: Autor.

A Tabela 29 apresenta os dados resultantes da análise de variância (ANOVA), teste F e coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 29 - Análise de variância para avaliação do Potencial de corrosão

Fator	SQ	GL	MQ	$F_{calculado}$
Regressão	0,0155	7	0,00222	706,94
Resíduo	0,0000	3	0,00000	
F.Ajuste	0,000004	1	0,00000	
Erro Puro	0,0000	2	0,00000	
Total	0,0155	10		
R^2	99,90%			
$F_{tabelado}$	8,89		$F_{calc}/ F_{tab} =$	79,52

Fonte: Autor

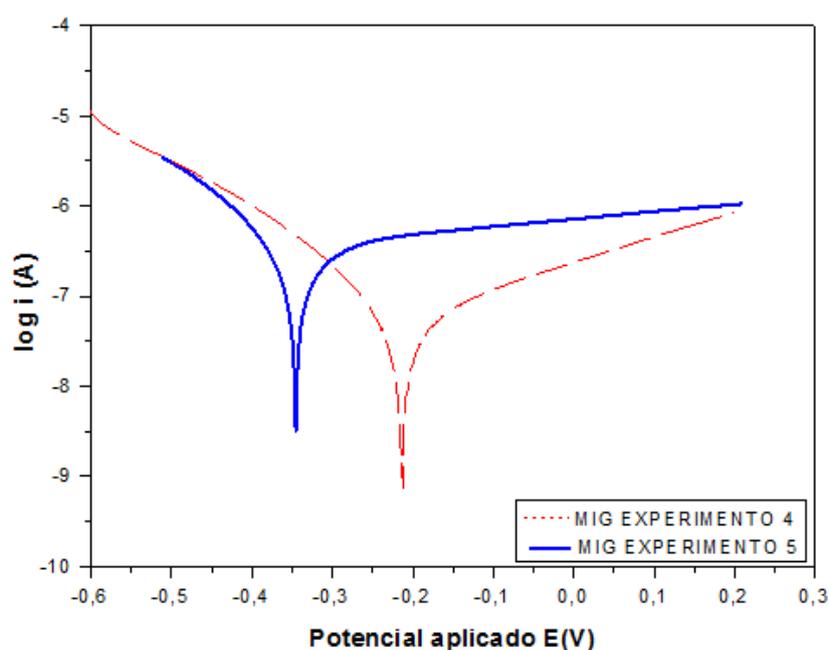
Portanto, os dados da Tabela 29, informa que o modelo apresentado na Equação 14 tem coeficiente de determinação (R^2) igual a 99,9 % das variações obtidas explicado pelo modelo, equação 14, e com um valor da razão de $F_{\text{calculado}}$ por F_{tabelado} igual a 79,52 indicando que o modelo é estatisticamente significativo com 95% de confiança com fins preditivos (Barros Neto et al., 1996).

5.2.4 Resistência à corrosão

A avaliação da resistência à corrosão dos revestimentos foi conduzida pela técnica de polarização potenciodinâmica linear (PPL) e para confirmação utilizou-se da técnica espectroscopia de impedância eletroquímica.

A Figura 71 apresenta as curvas de polarização potenciodinâmica dos experimentos 4 e 5 por soldagem MIG, os quais apresentam a maior e a menor diluição, 24,88 % e 12,77 %, dentre os 11 experimentos realizados. Assim o experimento 4 com maior diluição e teor de ferro, apresentou potencial de corrosão mais positivo que a amostra do experimento 5 com menor diluição, onde indica maiores propriedades anti-corrosivas.

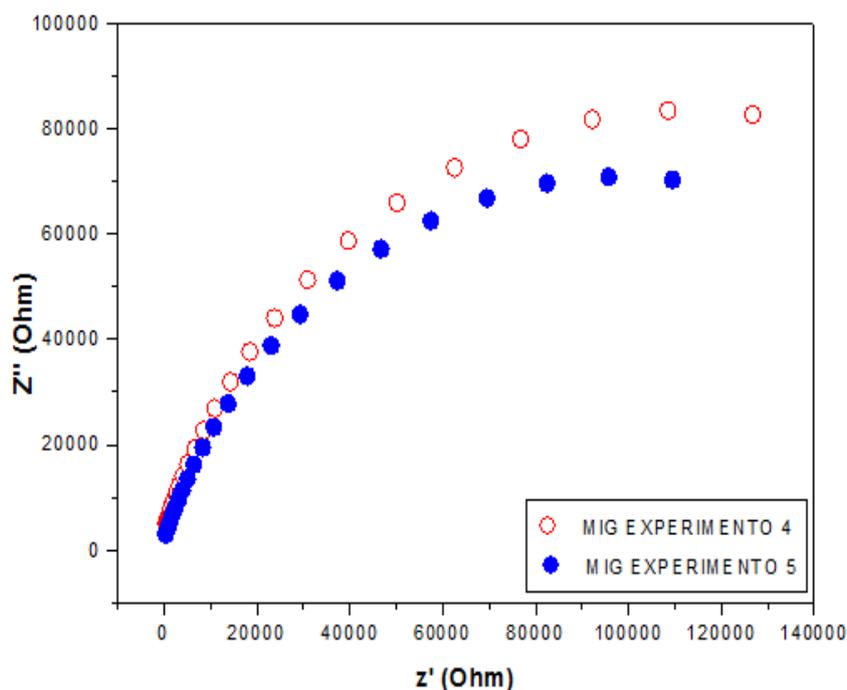
Figura 71 - Curva de polarização dos experimentos 4 e 5 por MIG.



Fonte: Autor

Para efeito de confirmação dos resultados das curvas de PPL sobre a resistência à corrosão, foram realizadas medidas de espectroscopia de impedância eletroquímica. A Figura 72 mostra o diagrama de impedância dos revestimentos com Inconel 625 dos mesmos experimentos avaliadas por PPL.

Figura 72 - Diagrama de impedância dos experimentos 4 e 5 por MIG.



Nesse diagrama, quanto mais alta for a curva, maior é o valor da resistência à polarização, R_p , cujo valor é tomado no eixo das abscissas traçando-se um semicírculo que melhor se ajuste à curva e maior será a resistência à corrosão do material exposto ao meio corrosivo (GENTIL, 2007; JAMBO e FÓFANO, 2008).

Assim, os resultados obtidos pela técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica confirmam os valores encontrados pela PPL, que indicou que os experimentos com maior nível de diluição e maior teor de Fe apresentaram maior resistência à polarização.

Tais resultados são contrários aos resultados encontrados por (SILVA, 2013 & BATISTA, 2011), onde encontraram resultados que mostram que quanto menor a diluição e menor o teor de ferro maior a resistência à corrosão.

Entretanto, os resultados encontrados podem ser relacionados com a diferença de energia de soldagem imposta os experimentos, uma vez que o experimento 4 foi conduzindo com uma energia de soldagem de 18,99 KJ/cm enquanto que o experimento 5 foi com 8,34KJ/cm. Assim a elevada energia de soldagem leva a uma velocidade de resfriamento menor e, conseqüentemente, ao favorecimento adequado do balanceamento químico entre as fases, tanto na zona fundida como na ZTA, levando a uma maior resistência à corrosão localizada (CARDOSO JÚNIOR et al., 2012).

A explicação também pode está relacionada com o nível de tensões residuais compressivas, ou seja, quanto mais elevada a energia de soldagem maior será o nível de tensões residuais compressivas, conseqüentemente maior a resistência à corrosão. MELO (2013) obteve em deposição por processo SAW um aumento de - 41 MPa na tensão residual compressiva quando aumentou a energia de soldagem de 12,90 KJ/cm para 14 KJ/cm , resultando em uma resistência a polarização de 194 KΩ (12,90 KJ/cm) e 206 KΩ (14 KJ/cm).

5.3 Estudo comparativo dos revestimentos por PTA-P e MIG com relação à resistência a corrosão

A Tabela 30 exhibe os resultados dos experimentos 4 e 5 por Soldagem MIG, e dos experimentos 2 e 3 por soldagem PTA-P.

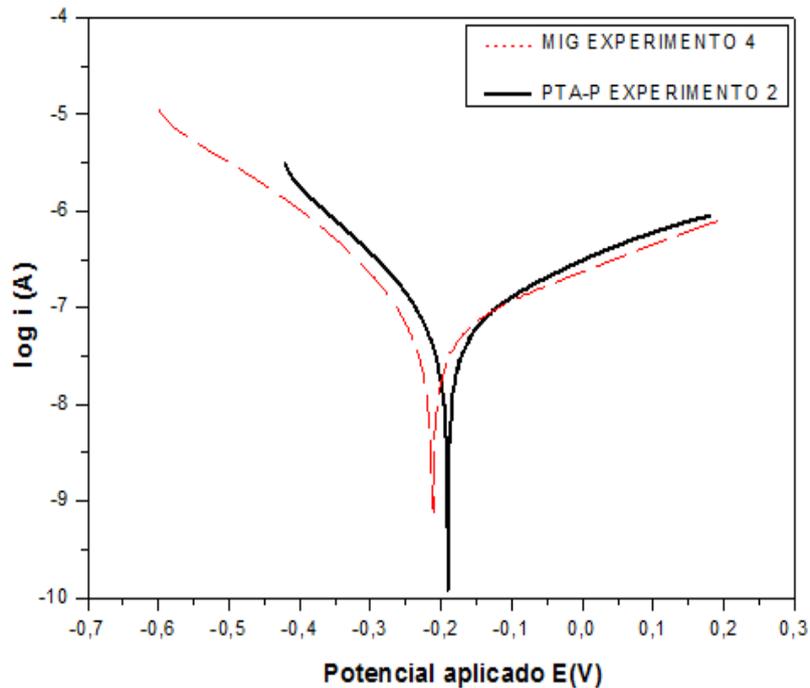
Tabela 30 - Resultados das medidas de polarização linear.

Experimento	H(kJ/cm)	D %	% Fe	R_p(KΩ)	E_{corr}(V)
MIG 4 - MIG	18,99	24,88	17,74	375,56	-0,21248
MIG 5 - MIG	8,34	12,77	5,54	130,85	-0,34476
2 - PTA-P	18,99	15,33	15,18	578,48	-0,1897
3 - PTA-P	8,34	5,02	3,60	151,77	-0,2877

Fonte: Autor

A Figura 73 mostra as curvas de polarização potenciodinâmica linear (PPL) dos valores obtidos dos revestimentos aplicados por soldagem MIG e PTA-P com o mesmo valor de energia de soldagem igual a 18,99 J/cm, que proporcionaram nível de diluição igual a 24,88 % (MIG) e 15,33 % (PTA-P), e teor de ferro de 17,74% (MIG) e 15,18% (PTA-P).

Figura 73 - Curva de polarização dos experimentos 4 por MIG e 2 por PTA-P.

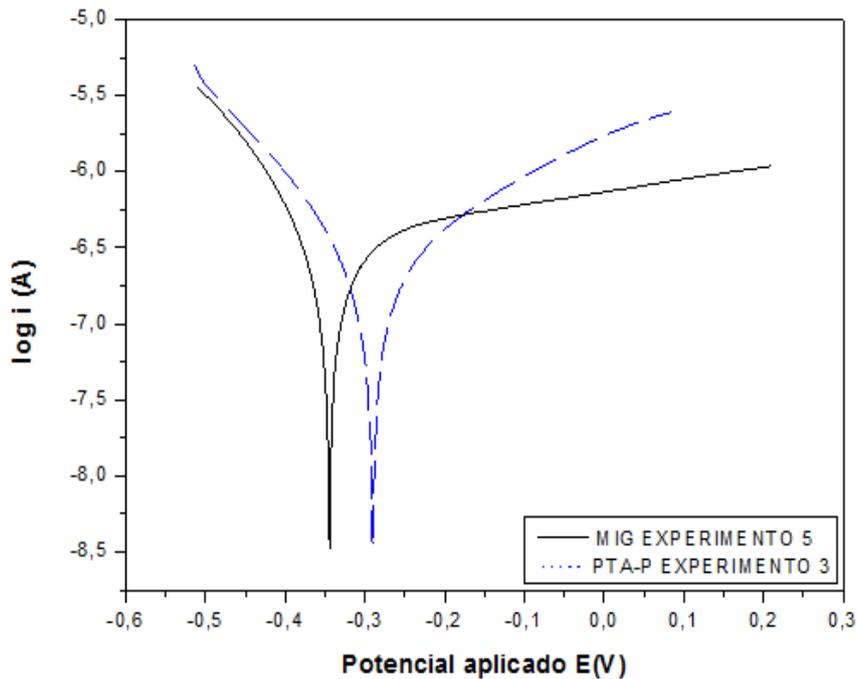


Fonte: Autor

Nota-se através da Figura 73 que a curva do experimento 2 obtida por soldagem PTA-P desloca o potencial de corrosão para potenciais mais positivos quando comparado ao revestimento do experimento 4 depositado por soldagem MIG. Este deslocamento para direita representa que quanto mais positivo for o potencial de corrosão aplicado, mais retardado será o início da corrosão. Resultados também mostram que quanto menor for valor da corrente, menor será a dissolução do revestimento.

A Figura 74 mostra as curvas potenciodinâmica linear (PPL) do experimento 5 (MIG) e do 3 (PTA-P), revestimentos estes aplicados com uma energia de soldagem igual a 8,34 J/cm, e com nível de diluição 12,77% (MIG) e 5,02%, e teor de ferro de 5,54% (MIG) e 3,60% (PTA-P).

Figura 74 - Curva de polarização dos experimentos 4 por MIG e 2 por PTA-P



Fonte: Autor

Nota-se através do gráfico da Figura 74 que o comportamento das curvas de polarização do experimento 3 por soldagem PTA-P e do experimento 5 depositado por soldagem MIG foi similar aos apresentados no gráfico da Figura 73.

Portanto, para a avaliação da corrosão em mesmo nível de energia imposto, verificou-se que os experimentos com menor percentual de diluição e teor de ferro, são menos susceptível a corrosão, sendo assim o teor de ferro principal responsável para início da corrosão.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais obtidos neste trabalho as conclusões são as seguintes:

- O Planejamento Experimental Fatorial associado a superfície de resposta utilizado mostrou-se eficiente para se encontrar os melhores parâmetros de soldagem para a obtenção de cordões de solda com perfis geométricos adequados para a aplicação dos revestimentos;
- Os menores valores do reforço, penetração e o baixo valor de diluição, inferior a 4,5 %, e o com índice de convexidade próximo de 30 % dos depósitos obtidos com o processo PTA-P demonstra a eficiência deste processo para aplicação de revestimentos contra corrosão;
- Os menores valores de dureza no metal depositado e na zona termicamente afetada dos revestimentos aplicados pelo processo PTA-P utilizando valores de energia de soldagem similares àqueles utilizados no processo MIG comprova o benefício do princípio daquele processo no que diz respeito a resistência à corrosão;
- Os maiores percentuais de Fe na superfície dos revestimentos aplicados com maior energia de soldagem demonstram a necessidade do estabelecimento e controle adequado dos parâmetros de soldagem para este fim.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar o planejamento experimental fatorial usando outras variáveis de entrada, tipo: gás de arraste, gás plasma, recuo do eletrodo, diâmetro do bocal, com objetivo de avaliar o efeito das mesmas nas características geométricas;
- Realizar a soldagem de deposição mudando o ângulo de inclinação da tocha, a fim de avaliar as características geométricas;
- Realizar a soldagem de deposição com outros tipos de pós, variando a granulometria;
- Realizar análise de tensões residuais nos revestimentos após soldagem e após usinagem dos revestimentos;
- Análise de corrosão dos revestimentos através do teste de imersão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

API 5L. Specification for Line Pipe. **American Petroleum Institute**, Washington, n. 42, p. 153, January 2000.

ALCÂNTARA. N. G. **Tecnologia de soldagem**. I Workshop de Grupos de Pesquisa do DEMa, 2002. Disponível em: http://www.dema.ufscar.br/dema/pdf/tecnologia_soldagem.pdf

ALVES, J. A., 2010, Desenvolvimento de um sistema de alimentação de consumíveis em pó para Soldagem PTA-P com capacidade para manipulação e transporte em oposição à gravidade. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil. AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Process**. Handbook, Capítulo 10 - 8ª ed., 1990.

ANSELMO, N., MAY J.E., MARIANO, N.A., NASCENTE P.A.P., KURI, S.E. **Corrosion behavior of supermartensitic stainless steel in aerated and CO2-saturated synthetic seawater**. Materials Science and Engineering, v.428, pp. 73-79, 2006.

ASTM G59 - Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements, 2009, **Disponível:** <http://www.astm.org/Standards/G59.htm>

ASM.Welding Brazing and Soldering.11 ed. Ohio: ASM International, v.6.1993b.

ASM International; 1992. p. 537–9.

ASM Specialty Handbook, Nickel, Cobalt, and Their Alloys, First Edition, ASM International, New York, USA, 2000.

ASM Handbook. Materials Park. Vol. 6, Ohio, 1993.

ASME IX. Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers and Welding and Brazing Operator., July 1, 2007.

BAI, Y.; BAI, Q. Subsea Pipelines and Risers. **Elsevier**. 565-583 p. 2005.

BARRA, S.R, 2003, **Influência do Processo MIG/MAG Térmico sobre a Microestrutura e a Geometria da Zona Fundida**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Barros Neto, B.; Scarminio, I.S.; Bruns, R.E. Planejamento e otimização de experimentos. 2ª Ed. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 1996.

BATISTA, V. R. 2011, Influência dos parâmetros de soldagem sobre as características de revestimentos de liga de níquel aplicados em aços API 5L Gr B pelo processo arco submerso. **Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais**, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.

BENYOUNIS, K. Y.; OLABI, A. G. Optimization of different welding processes using statistical and numerical approaches – A reference guide, **Science Direct**, v.39, p. 483–496, 2008.

BOND, D., OKIMOTO, P.C, D'OLIVEIRA, A.S.C.M., Efeito da Intensidade de Corrente nas Características de Revestimentos Soldados com Material de Adição Atomizado. **Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação III COBEF**. Joinville, 2005.

BOND, D., BECKER, S. F., D'Oliveira, A. S. C.M. **Influência** da Corrente e Granulometria do Material de Adição nos Revestimentos Processados por PTA. **Revista Soldagem & inspeção**. São Paulo, Vol. 16, Nº. 1, p.053-061, Jan/Mar 2011.

CALLISTER JR, W. D. **Uma Introdução a Engenharia e a Ciências dos Materiais**, 5ª edição, editora LTC, 2002, p.589.

CARDOSO JUNIOR, R. et al., Avaliação da soldagem multipasse de chapas espessas de aços inoxidáveis lean duplex UNS S32304 soldadas pelos processos SMAW, GMAW e FCAW: parte 1: propriedades mecânicas. **Soldagem e Inspeção**, v. 17, p. 306-316, 2012.

CARVALHO, L. A. de; ANDRADE, A. R. de, BUENO, P. R.. Espectroscopia de impedância eletroquímica aplicada ao estudo das reações heterogêneas em ânodos dimensionalmente estáveis. **Revista Química Nova**, 2006, vol.29, n.4, pp. 796-804.

CHOUDHURY, I.A., EL-BARADIE, M.A., Machinability of nickel-base super alloys: a general review”, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 77, pp.278-284, 1998.

Cosima website. Disponível em www.cosima.com.

CORREIA, E. A. S.; CARDOZA, J. A. S. Planejamento de experimentos no processo produtivo utilizando o método Taguchi, **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Ano 6, nº1, Jan-Mar/2011, p. 55–66.

DAI, W. S.; CHEN, L. H.; LUI, T. S. SiO₂ particle erosion of spheroidal graphite cast iron after surface remelting by the plasma transferred arc process. **Wear** 248. p 201–210, (2001).

DAVIS, J.R. Hardfacing, weld cladding, and dissimilar metal joining: Welding, Brazing and Soldering, **Metals Handbook**, 10ª ed. Ohio: ASM International, **Metals Park**, v.6, 1993.

DEUIS, R. L. et al. Metal-Matrix composite coatings by PTA surfacing. **Composites Science and Technology**, v.58, n.2, p. 299-309, 1998.

DEARDO, A. J. Multi-phase Microstructures and Their Properties in High Strength Low Alloy Carbon Steels. **ISIJ International**, v. 35, p. 946-954, 1995.

DÍAZ, V. V., Dutra, J. C., D'OLIVEIRA, A.S.C.M. ,Deposição por Plasma com Arco Transferido, **Revista Soldagem & Inspeção**. São Paulo, Vol. 15, Nº. 1, p.041-051, Jan/Mar 2010.

DOTTA, R; VIEIRA, D.P; SAMPAIO, C.M. Estudo de resistência ao avanço em embarcações do tipo SWATH, **24º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore**. Rio de Janeiro, 2012.

DUPONT, J. N., MARDER, A.R. Thermal efficiency os arc welding process. **Welding Journal**, vol 74, n12, p.406s-416s, 1995.

FUERSCHBACH, P. W.; KNOROVSKY, G. A. A Study of Melting Efficiency in Plasma Arc and Gas Tungsten Arc Welding. **Welding Journal**, p. 287-297-s, Nov. 1991.

FRANKEL, G. S. Electrochemical Techniques in Corrosion: Status, Limitations, and Needs. **Journal of ASTM International**, v.5, n.2, p.1-27, 2008.

FRATARI, R. Q., SCHVARTZMAN, M.M.A.M., SCOTTI, A. Otimização dos parâmetros de tecimento para confecção de amanteigamento em chapas de aço ao carbono pelo processo TIG com arame AWS ER309L. **Revista Soldagem & Inspeção**. São Paulo, Vol.15, Nº. 3, Setembro 2010.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 5ª edição, Rio de Janeiro, 2007.

GEMELLI, E., Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

GORNI, A.A., Silveira, J.H.D. Interação entre as demandas das aplicações e as características e especificações de chapas grossas. Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, Belo Horizonte (MG), 25 a 28 de Julho de 2005.

GUILHERME, L.H. 2011, **Estudo da corrosão em junta tubo-espelho soldada por SATG entre as ligas AISI 316 L e AISI 444**. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, SP, Brasil.

HALLEN, H., LUGSCHEIDER, E., AIT-MEKIDECHE, A. Plasma transferred arc surfacing with high deposition rates. In: Proceedings of conference on thermal spray coatings: properties. **Processes and Applications**, Pittsburgh, USA, 4–10 May 1991.

HALLEN, H. et al. Plasma Transferred Arc Surfacing with High Deposition Rates. **Proceedings of the 4th National Thermal Spray Conference**. p. 537-539. Pittsburg, mai. 1991.

HERNANDEZ JR, P. C.; FONSECA, J. E. F.; DICK, L. F. P. Desenvolvimento de metodologia para avaliação de aços esferoidizados. Parte 1: determinação do grau de descarbonetação, **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**; v. 6, n. 3, p. 153-157, jan.-mar. 2010.

HILLENBRAND, H. G.; KALWA, C.; Production and Service Behaviour of High Strength Large Diameter Pipe. In: **International Conference on Application and Evaluation of High Grade Line pipes in Hostile Environments**. Yokohama, Japan, 2002.

HULKA, K. High Strength Large Diameter Pipe Plate from Standard Production To X80/X100. Produzido Por: **Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração**.:
http://www.cbmm.com.br/portug/sources/techlib/info/others_in_pdf/pdfs/high_strength_large.pdf. Acessado em: Setembro/13.

JAMBO, H. C. M.; FÓFANO, S. **Corrosão**: Fundamentos, Monitoração e Controle. Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda, 2008.

JOUBERT, J. M. **Crystal chemistry and calphad modeling of the sigma phase**. Progress in Materials Science 53, 2008. P. 528 -583.

LIMA, D. B. P. L., 2006, **Avaliação da soldabilidade do aço inoxidável superduplex UNS S32750**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

KEJELIN, N. Z. 2006. **Influência dos parâmetros de soldagem na formação de zonas parcialmente diluídas em soldas de metais dissimilares**, Dissertação de mestrado em Ciência e Engenharia e de Materiais pela Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil.

LIMA, B.D.P.L. 2001. **Efeitos da energia de soldagem na microestrutura do aço inoxidável superduplex UNS S32750**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

LIMA, V. B. S.; BALESTRASSI, P. P.; PAIVA, A. P. Otimização do desempenho de amplificadores de radio frequência banda larga: uma abordagem experimental, **Produção**, v. 21, n. 1, p. 118-131, jan/mar, 2011.

LIPPOLD, J.C.; VAROL, I.; BAESLACK III, W.A. The influence of composition and microstructure on the HAZ toughness of duplex stainless steel at 20°C. **Welding research supplement** , pp. 75-79. (1994).

MANSFELD, F. Tafel Slopes and Corrosion Rates Obtained in the Pre-Tafel region of Polarization Curves. **Corrosion Science**, v.47, p.3178–3186, 2005.

MALCOLN, J. G. A Guide for Understanding & Specifying Chemical Composition of High Strength Linepipe Steels. **Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração**, 37 p. 2007.

MARCONI, M. I Riporti duri con polveri saldate com il processo P.T.A. (Plasma ad Arco Trasferito). **Livro Online (www.plasmateam.com)**, 320 p. 2002.

MARIANO, N.A.; PIRES, A. da C.; MUROLO, J. P.; KURI, S.E. Avaliação da resistência à corrosão em aço inoxidável martensítico do tipo Cr-Ni em meio marinho sintético simulando atividades em águas profundas. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 59, n. 1, p.135-139, jan.mar. 2006.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem – Fundamentos e Tecnologia**. 3. Ed. Belo Horizonte: Editora da UFMG, v. 1, 2009. 219 p.

MELO, R.H.F. 2013. **Avaliação da Influência do processo e dos parâmetros de soldagem sobre a resistência à corrosão de revestimentos de aço inoxidáveis AWS e 308-L T1 aplicados em aços ASTM A36**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil.

MODENESI, P., **Introdução à física do arco elétrico**. UFMG, Belo Horizonte, Janeiro, 2005.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**, 4ª edição, LTC, 2009, 514 p.

NASCIMENTO, A. S., MENEZES JUNIOR, L. C., VILARINHO, L.O. Efeito do Formato de Onda e Gás de Proteção sobre a Taxa de Fusão e Geometria do Cordão na Soldagem MIG/MAG-PV, **Revista Soldagem & Inspeção**. São Paulo, Vol.17, Nº. 1, p.040-048, Jan/Mar 2012.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**, 3ª edição, editora Unicamp, 2007, 480 p.

NILO Jr., L. P. 2003. **Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise experimentos**. Dissertação de Mestrado. Itajubá: UNIFEI, NORRISH, J. **Advanced Welding Process**, 375pg, Cranfield Institute of Technology, p. 147, 1992.

OLIVEIRA, P. C.A. de; BERTAZZOLI, R.. Determinação da densidade de corrente de corrosão em meios de baixa condutividade: uso de microeletrodos para minimizar a queda ôhmica. **Revista Química Nova**, São Paulo, v. 34, n. 2, p.325-329, 30 nov. 2010.

OLIVEIRA, M.A.2001. **Estudo da soldagem plasma com alimentação automática de arame para aplicação em revestimentos metálicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.

OLIVEIRA, M. A. 2006. **Desenvolvimentos no Processo Híbrido Plasma-MIG para Operações de Soldagem e Brasagem**. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica), UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.

PAVLENKO, A.1996. **Neue Kenntnisse über Physikalische Grundlagen des Plasma-Pulver-Auftragschweißens als Basis für die Prozeßsteuerung**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Rheinisch-Westfälisch Technische Hochschule Aachen.

PETROBRAS; **Plano de Negócios** 2012-2016.

PETROBRÁS N-1707. Projeto de vaso de pressão com revestimento. Rio de Janeiro-RJ: Petróleo Brasileiro S.A. 2011.

POORQASEMI, E.; ABOOTALEBI, O.; PEIKARI, M. e HAQDAR, F. Investigating Accuracy of the Tafel Extrapolation Method in HCl solutions. **Corrosion Science**, v.51, p.1043–1054, 2009.

PHADKE, M. S. **Quality engineering using robust design**, 1st edition, New York, Prentice Hall, 1989, 333 p.

PEREPEZKO, J.H. The hotter the engine, the better. **Science**, USA, v. 326, p. 1068-1069, nov. 2009.

PESSOA, A. R. P.2009. **Revestimento de Ligas de Níquel pelo Processo MIG/MAG com Transferência por Curto-Circuito**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.

PESSOA, A. R. P., MIRANDA, H. C., FARIAS, J. P., AGUIAR, W. M., FILHO, F. de A. Seleção de Parâmetros Através do Método Taguchi para Soldagem de Revestimento com Ligas de Níquel pelo Processo MIG/MAG. **Revista Soldagem & Inspeção**. São Paulo, Vol. 15, No. 4, p.317-324, Out/Dez 2010.

PÉREZ, G. J. A., 2005. **Caracterização das fases presentes em depósito de níquel Er-NiCrMo-3 em tubos de aço de 9Cr1Mo usados em fornos de refinaria de petróleo**. Dissertação de mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais pela Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, Brasil.

PFINGSTAG, M.E, 2009.**Avaliação do comportamento à Fadiga e à corrosão fadiga de juntas soldadas da liga Inconel 625, como material de interesse para a industrial petrolífera**, Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre- RS, Brasil.

RAMIREZ, M. F. G.; Estudo da Transformação Durante o Resfriamento Contínuo e da Microestrutura do Aço Microligado X80 Utilizado na Construção

de Tubos para Transporte de Gas Natural e Petroleo. **Dissertacao de Mestrado**. USP, Sao Paulo, SP, 2008.

REINALDO, P. R., 2008. Influência dos parâmetros de processamento por pta e do substrato, na resistência ao desgaste de um revestimento a base de Ni. **Dissertação de Mestrado**. UFPR, Curitiba, PR, 2008.

REIS, R. P., COSTA, A. L. G., SILVEIRA, F. M., MOTA, P. R., SOUZA, R. J.; SCOTTI, A. Influência do Material de Base sobre o Rendimento de Fusão em Soldagem a Arco. **Revista Soldagem e Inspeção**, v. 16, n. 4, p. 369-376, São Paulo, 2011.

RIBEIRO, H. O. 2007. Desenvolvimento de Ligas para Revestimentos por PTA Resistentes à Cavitação. **Tese (Doutorado em Engenharia)** - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

ROSA, L. B. 2011. **Estudo do comportamento termomecânico do aço API 5L microligado ao Nb-V-Ti por ensaios de torção a quente**. Dissertação (Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

REED, R.C., **The Superalloys: Fundamentals and Applications**, Cambridge, Cambridge University Press, 2006.

SANTOS NETO, N. F. **Caracterização de Soldas em Aços API 5L Com Diferentes Arames Tubulares e Temperaturas de Pré-Aquecimento**, 2003. 110 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2003.

SANTOS, R. L. C., 2003. **Deposição por plasma de arco transferido com corrente contínua pulsada**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Área de concentração – Materiais e Manufatura, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, Brasil.

SANTOS, T. F., OLIVEIRA, M. A., DUTRA, J. C. Estudo da Taxa de Fusão de Arames de Aço Carbono no Processo MIG/MAG. **XXVIII CONSOLDA** – Congresso Nacional de Soldagem, São Paulo, 2002.

SCHWEDERSKY, M. B.; DUTRA, J. C. Um Estudo da Eficiência Térmica dos Principais Processos de Soldagem a Arco. **XXXVII Congresso Nacional de Soldagem – CONSOLDA 2011**, Natal, 2011.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.; NORRISH J.; LUCAS, W. Metal Transfer Modes in MIG/MAG (GMAW) Welding: **Contributions to a New IIW Classification**. IIW Doc. XII-1960-09, 2009.

SICILIANO, F. Materiais para Gasodutos: Aços de Alta Resistência para Dutos de Transporte de Gás e Petróleo - Tendências Atuais. **Metalurgia & Materiais**. São Paulo: Vol. 64, Nº. 588, 2008, p. 208 – 211.

SILVA, S.R.S. 2012. **Desenvolvimento do Processo de Soldagem Plasma-keyhole – Mag em Tandem** Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.

SILVA, M. M. 2013 Avaliação da compatibilidade metalúrgica e da resistência à corrosão de revestimentos da liga AWS ER NiCrMo-4 aplicados por soldagem SAW sobre o aço API 5L Gr B. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

SILVA, R. H. G. Processo PTA-P – Uma Revisão da Literatura como Base para Inovações. Parte 2 de 2: Comportamento Térmico e Cinemático do Pó, Parâmetros e Consumíveis do Processo. **Revista Soldagem & Inspeção**. São Paulo, Vol.17, Nº. 2, p.173-183, Abr/Jun 2012 173.

SILVA, R. H. G . 2010. **Inovações em Equipamentos e em Parametrização no Processo de Revestimento por Plasma-Pó (PTA-P)**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

SILVA, César Rezende; FERRARESI, Valtair Antonio; SCOTTI, Américo. A quality and cost approach for welding process selection. J. Braz. Soc. Mech. Sci., Campinas, v. 22, n. 3, 2000.

SOEIRO JUNIOR, J.C, ROCHA, D. B, BRANDI, S.D - Uma Breve Revisão Histórica do Desenvolvimento da Soldagem dos Aços API para Tubulações. **Revista Soldagem & Inspeção**. São Paulo, Vol. 18, Nº. 02, p.176-195, Abr/Jun 2013.

VEINTHAL, R., SERGEJEV, F., ZIKIN, A., TARBE, R., HORNUNG, J. Abrasive Impact Wear and Surface Fatigue Wear Behaviour of Fe–Cr–C PTA overlays. **Wear** 301 (2013) 102–108.

YIN, Z.F., ZHAO, W.Z., LAI, W.Y, and ZHAO, X.H., Electrochemical behaviour of Ni-base alloys exposed under oil/gas field environments: **Corrosion Science**., 51 (2009) 1702.

ZHAO, M. C., YANG, K., SHAN, Y-Y. “The Effects of Thermo-mechanical Control Process on Microstructures and Mechanical Properties of a Commercial Pipeline Steel”, **Materials Science and Engineering A** v. 335, 2002. pp. 14 – 20.

WALSH, D. A ., LI, L. E., BAKARE, M.S., VOISEY, K.T., Visualisation of the local electrochemical activity of thermal sprayed anti-corrosion coatings using scanning electrochemical microscopy. **Electrochimica Acta**, 54, p. 4647. (2009).

WAINER, E.; BRANDI, S.; MELLO, F. D. H.. **SOLDAGEM: Processos e Metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1992.

WAHL, W.; KRAUSKOPF, F. Plasma-arc Powder Surfacing of Ferrous Materials. *Welding and Cutting*, n. 2, p. 15-16. Düsseldorf, fev. 1993.

WOLYNEC, S.; **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/metalurgia/119-energia-de-soldagem.html>. Soldagem – Coleção tecnológica SENAI – 1ª ed. 1997 Acessado em 18/01/2014.

<http://www.plasmateam.com..> Acessado em 15 de dezembro de 2012.

ANEXO

TABELA A- Pontos de percentagem da distribuição F, 5%

Tabela 4 - Pontos de percentagem da distribuição F, 5%.

$V_1 \backslash V_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161,40	199,50	215,70	224,60	230,20	234,00	236,80	238,90	240,50	241,90	243,90	245,90	248,00	249,10	250,10	251,10	252,20	253,30	254,30
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,41	19,43	19,45	19,45	19,46	19,47	19,48	19,49	19,50
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,70	8,66	8,64	8,62	8,59	8,57	8,55	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,86	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,62	4,56	4,53	4,50	4,46	4,43	4,40	4,36
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,94	3,87	3,84	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,51	3,44	3,41	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,22	3,15	3,12	3,08	3,04	3,01	2,97	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,01	2,94	2,90	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,85	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,72	2,65	2,61	2,57	2,53	2,49	2,45	2,40
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,69	2,62	2,54	2,51	2,47	2,43	2,38	2,34	2,30
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,53	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,25	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,53	2,46	2,39	2,35	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,40	2,33	2,29	2,25	2,20	2,16	2,11	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,35	2,28	2,24	2,19	2,15	2,10	2,06	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,31	2,23	2,19	2,15	2,10	2,06	2,01	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,27	2,19	2,15	2,11	2,06	2,02	1,97	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,23	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,20	2,12	2,08	2,04	1,99	1,95	1,90	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,18	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,87	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,23	2,15	2,07	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,20	2,13	2,05	2,01	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,18	2,11	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,79	1,73
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,16	2,09	2,01	1,96	1,92	1,87	1,82	1,77	1,71
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,15	2,07	1,99	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,69
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,13	2,06	1,97	1,93	1,88	1,84	1,79	1,73	1,67
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,12	2,04	1,96	1,91	1,87	1,82	1,77	1,71	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,10	2,03	1,94	1,90	1,85	1,81	1,75	1,70	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,09	2,01	1,93	1,89	1,84	1,79	1,74	1,68	1,62
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,00	1,92	1,84	1,79	1,74	1,69	1,64	1,58	1,51
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,92	1,84	1,75	1,70	1,65	1,59	1,53	1,47	1,39
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,17	2,09	2,02	1,96	1,91	1,83	1,75	1,66	1,61	1,55	1,50	1,43	1,35	1,25
∞	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,75	1,67	1,57	1,52	1,46	1,39	1,32	1,22	1,00