

# UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

ANDRÉ CANAL LÁZARO COUTINHO

ESTUDO E ANÁLISE MULTIVARIADA ROBUSTA DE PARÂMETROS DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO A PLASMA POR ARCO TRANSFERIDO (PTA-P) EM SOLDAGEM OVERLAY DISSIMILAR À BASE DE INCONEL 625

> VITÓRIA 2014



ANDRÉ CANAL LÁZARO COUTINHO

# ESTUDO E ANÁLISE MULTIVARIADA ROBUSTA DE PARÂMETROS DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO A PLASMA POR ARCO TRANSFERIDO (PTA-P) EM SOLDAGEM OVERLAY DISSIMILAR À BASE DE INCONEL 625

Projeto de graduação apresentado ao Corpo Docente do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Temístocles de Souza Luz.

VITÓRIA 2014

## COUTINHO, Lázaro; CANAL, André.

Estudo e Análise Multivariada Robusta de Parâmetros do Processo de Deposição a Plasma por Arco Transferido (PTA-P) em Soldagem overlay dissimilar à base de Inconel 625 / Lázaro Coutinho; André Canal – 2014.99f.

Orientador: Temístocles de Souza Luz

Projeto de Graduação – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Soldagem de Revestimentos Dissimilares. 2. Inconel 625. 3. PTA-P. 4. Diluição. 5. *Iteratively Reweighted Least Squares.* 6. *Ordinary Least Square.* I. COUTINHO, Lázaro. II. CANAL, André. III. Universidade Federal Do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Estudo e Análise Multivariada Robusta de Parâmetros do Processo de Deposição a Plasma por Arco Transferido (PTA-P) em Soldagem overlay dissimilar à base de Inconel 625.

# ANDRÉ CANAL LÁZARO COUTINHO

# ESTUDO E ANÁLISE MULTIVARIADA ROBUSTA DE PARÂMETROS DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO A PLASMA POR ARCO TRANSFERIDO (PTA-P) EM SOLDAGEM OVERLAY DISSIMILAR À BASE DE INCONEL 625

Projeto de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 19 de março de 2013.

# COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Temístocles de Sousa Luz UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO Orientador

Eng. Leandro Entringer Falqueto UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO Examinador

Eng. Mariana Xavier Milagre UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO Examinadora

# AGRADECIMENTOS

Os futuros engenheiros mecânicos e autores deste trabalho, compartilham a felicidade pelo cumprimento de mais uma etapa em suas vidas e por isso, agradecem,

A Deus pela fortaleza e perseverança concedidas no decorrer desta pesquisa e durante toda a graduação;

Gratulam ainda,

Seus pais, familiares, amigos e todas as pessoas de bem que contribuíram para realização desta conquista.

Ao Prof. Dr Temístocles de Souza Luz pela orientação, auxilio, confiança e paciência.

"Quando ouvires os aplausos do triunfo, que ressoem também aos teus ouvidos os risos que provocaste com os teus fracassos."

São Josemaria Escrivá

#### RESUMO

A produção e exploração de Petróleo e Gás em águas cada vez mais profundas agregam consigo o aumento das exigências de gualidade. A constante degradação devida à corrosão e desgaste, associados a esforços mecânicos, nos faz buscar formas de garantir elevada vida útil dos equipamentos utilizados, ou mesmo recuperar as áreas já degradadas. Revestir a região exposta ao meio degradante garante a proteção e evita a fabricação de componentes maciços constituídos por materiais nobres, de alto custo. Este trabalho apresenta o estudo das características de produtividade, geometria e qualidade de revestimentos dissimilares a base de Inconel 625 simplesmente depositados sobre o aço ASTM A36 utilizando o processo de soldagem Plasma de arco transferido alimentado com pó (PTA-P) na posição plana. Através dos resultados de testes exploratórios modelados pelo planejamento Fatorial Fracionário, tomaram-se como variáveis de entrada a Corrente, taxa de alimentação de pó, distância bico de contato peça (DBCP) e o recuo do eletrodo. Posteriormente as ferramentas estatísticas de Planejamento de Experimentos e superfície de resposta foram utilizadas no modelamento dos testes definitivos e das respostas analisadas devido a detecção de Outliers que são dados experimentais obtidos para as respostas analisadas que tornam a análise proposta confusa, ou até mesmo inválida. Para tanto, o método IRLS (Iteratively Reweighted Least Squares) foi utilizado para obtenção dos coeficientes geradores da superfície de resposta, já que o método comumente proposto, OLS (Ordinary Least Square), possui alta sensibilidade. Os resultados indicam que é possível efetuar depósitos em um único passe congregando altas taxas de deposição, elevados reforços e largura, níveis de diluição inferiores a 5 %, ausência de defeitos como porosidades e falta de fusão. Utilizam para isso baixos níveis de energia por comprimento do cordão e reduzida quantidade de material aportado. Com isso, pode-se estabelecer um preâmbulo para a comparação direta entre o PTA-P e outros processos comumente utilizados na indústria para esta aplicação abordada.

**Palavras-Chave**: Soldagem de Revestimentos Dissimilares, Inconel 625, PTA-P, diluição, *Iteratively Reweighted Least Squares, Ordinary Least Square.* 

#### ABSTRACT

The exploration and production of oil and gas in ever deeper waters laden with the increased demands for quality. The constant degradation due to corrosion and wear associated with mechanical stress makes us look for ways to ensure long service life of the equipment used, or even retrieve the already degraded areas. Take the region exposed to degrading means to guarantee the protection and prevents the production of massive components made of high quality materials, high cost. This paper presents the study of productivity features, geometry and quality of dissimilar based coatings Inconel 625 simply deposited on ASTM A36 steel using the process of Plasma transferred arc welding fed powder (PTA- P) in the flat position. Through the results of exploratory tests modeled by fractional factorial design, were taken as input variables of the current, powder feed rate, distance contact tip piece (DBCP) and the retreat of the electrode. Subsequently the statistical tools of Design of Experiments and response surface modeling were used in the final tests and analyzed the responses. Due to detect outliers, the experimental data analyzed for responses that make the analysis proposed confused, even invalid. Thus, the IRLS (Iteratively Reweighted Least Squares) method was used to obtain the coefficients of generating response surface, since the commonly proposed method, OLS (Ordinary Least Square), has high sensitivity. The results indicate that it is possible to deposit money in one pass bringing high deposition rates, high ribs and width dilution levels below 5%, no defects such as lack of fusion and porosity. Use it to lower energy levels by length of cord and reduced amount of material contributed. Thus, one can establish a preamble for direct comparison between PLA -P and other processes commonly used in industry for this application addressed.

**Keywords:** Dissimilar welding overlay, Inconel 625, PTA-P, dilution, *Iteratively Reweighted Least Squares, Ordinary Least Square.* 

# LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Ilustração de uma tocha de soldagem a plasma16
igura 2.2 - Representação Esquemática do Arco Piloto e do Arco Transferido
(adaptado de OLIVEIRA, 2001)18
Figura 2.3 - Corte transversal dos bicos constritores mostrando a entrada do fluxo de
pó no arco plasma (adaptado de DÍAZ, 2005)19
Figura 2.4 - Influência do fator recuo do eletrodo sobre o grau de constrição do arco
(adaptado de DÍAZ, 2005)21
Figura 2.5 - Tensão do Arco em Função de Recuo para diferentes Distâncias Bico
Constritor Peça (adaptado de OLIVEIRA, 2001)21
Figura 2.6 - Distância Bocal Constritor Peça (DBCP), Recuo do Eletrodo (Rc) e o
diâmetro do bico constritor22
Figura 2.7 - Efeito do fator distância tocha-peça na tensão do arco (adaptado de
DÍAZ, 1999)
Figura 2.8 – Alguns tipos de tecimentos25
Figura 2.9: Relação vetorial entre as velocidades de deslocamento longitudinal
(Vsold) e de oscilação (Vosc), e a resultante transversal (Vtr) com que a tocha se
desloca25
Figura 2.10 - Parâmetros da geometria do cordão de solda
Figura 2.11 – Diluição e difusão entre os elementos do metal base e do metal de
adição (adaptado de GOMES, 2010)27
Figura 2.12 - Representação da área da seção transversal do cordão de solda28
Figura 2.13 – Princípio de operação da soldagem de revestimento
Figura 2.14– Exemplo de gráfico de superfície de resposta para x1, x2
Figura 3.1 - Morfologia do INCONEL 625 atomizado (53 a 150 µm), por MEV (Microscópio
Eletrônico de Varredura)
Figura 3.2 - Equipamentos da bancada41
Figura 3.3 - a) Destaque do ADP; b) Destaque da fixação do corpo de prova; c) Destaque do
tartílope e tocha de soldagem; d) Estufa42
Figura 3.4 - Procedimento para medição das respostas43
Figura 5.1 - Efeitos principais sobre a diluição53
Figura 5.2 - Efeitos principais sobre a penetração53

Figura 5.3 - Efeitos principais sobre a área fundida	55
Figura 5.4 - Efeitos principais sobre a área de reforço	56
Figura 5.5 - Efeitos principais sobre o reforço	57
Figura 5.6 - Efeitos principais sobre a largura	58
Figura 5.7 - Efeitos principais sobre o rendimento	59
Figura 5.8 - Efeitos principais sobre o índice de convexidade	60
Figura 5.9 - Efeitos principais sobre a taxa de deposição	61
Figura 5.10 - Superfícies de Resposta e efeitos de interação. (Para valores coc	lificados
de corrente = 2 e tx = 0)	63
Figura 5.11 - Superfícies de Resposta e efeitos de interação. (Para valores coc	lificados
de corrente = 1 e tx = 0).	64

# LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Descrição das funções para modelos de primeira e segunda ordem	.32
Tabela 2.2: Ilustração dos pontos fatoriais, Axiais e Centrais em um CCD	.34
Tabela 2.3: Descrição dos tipos de CCD	.35
Tabela 3.1 - Composição Química (%) do metal de base - ASTM A36	.39
Tabela 3.2 - Limites de composição química do Inconel 625 (%)	.41
Tabela 4.1 - Parâmetros Fixos	.45
Tabela 4.2 - Gases utilizados e suas vazões	.46
Tabela 4.3 - Respostas Analisadas e suas Categorias	.46
Tabela 4.4 - Fatores e níveis de Trabalho codificados	.46
Tabela 4.5 - Matriz experimental com os resultados	.47
Tabela 4.6 - Medidas de Posição e Dispersão das Respostas	.48
Tabela 4.7 - Coeficientes estimados para os modelos quadráticos por IRLS.	M-
Estimator de Huber Bisquare	49
Tabela 4.8 - Coeficientes estimados para os modelos quadráticos por OLS	51
Tabela 4.9 - Matriz de Correlação das Respostas	.52

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Importância do tema	12
1.2. Objetivos	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1. Considerações iniciais	14
2.2. Superligas	14
2.2.1. Superligas de Níquel	15
2.3. Processo de soldagem por plasma	15
2.4. Processo de soldagem PTA-P	17
2.4.1. Abertura do Arco	17
2.4.2. Tocha	18
2.4.3. Alimentador de Pó (ADP)	19
2.4.4. Diâmetro do Orifício Constritor	20
2.5. PARÂMETROS DO PROCESSO	20
2.5.1. Recuo Do Eletrodo	20
2.5.1. Recuo Do Eletrodo	20 20 22
<ul> <li>2.5.1. Recuo Do Eletrodo</li></ul>	20 20 22 23
<ul> <li>2.5.1 Recuo Do Eletrodo</li> <li>2.5.2. Distância Bocal Constritor Peça, DBCP</li> <li>2.5.3. Corrente De Soldagem</li> <li>2.5.4. Taxa de Alimentação de Pó</li> </ul>	20 20 22 23 23
<ul> <li>2.5.1 Recuo Do Eletrodo</li></ul>	20 20 22 23 23 23
<ul> <li>2.5.1 Recuo Do Eletrodo</li> <li>2.5.2. Distância Bocal Constritor Peça, DBCP</li> <li>2.5.3. Corrente De Soldagem</li> <li>2.5.4. Taxa de Alimentação de Pó</li> <li>2.5.5. Gás de Plasma</li> <li>2.5.6. Gás de proteção</li> </ul>	20 20 22 23 23 23 23 24
<ul> <li>2.5.1 Recuo Do Eletrodo</li> <li>2.5.2 Distância Bocal Constritor Peça, DBCP</li> <li>2.5.3 Corrente De Soldagem</li> <li>2.5.4 Taxa de Alimentação de Pó</li> <li>2.5.5 Gás de Plasma</li> <li>2.5.6 Gás de proteção</li> <li>2.5.7 Tecimento</li> </ul>	20 22 23 23 23 23 24 24
<ul> <li>2.5.1 Recuo Do Eletrodo</li> <li>2.5.2 Distância Bocal Constritor Peça, DBCP</li> <li>2.5.3 Corrente De Soldagem</li> <li>2.5.4 Taxa de Alimentação de Pó</li> <li>2.5.5 Gás de Plasma</li> <li>2.5.6 Gás de proteção</li> <li>2.5.7 Tecimento</li> <li>2.5.8 Velocidade De Soldagem</li> </ul>	
<ul> <li>2.5.1 Recuo Do Eletrodo</li></ul>	
<ul> <li>2.5.1 Recuo Do Eletrodo</li> <li>2.5.2. Distância Bocal Constritor Peça, DBCP</li> <li>2.5.3. Corrente De Soldagem</li> <li>2.5.4. Taxa de Alimentação de Pó</li> <li>2.5.5. Gás de Plasma</li> <li>2.5.6. Gás de proteção</li> <li>2.5.7. Tecimento</li> <li>2.5.8. Velocidade De Soldagem</li> </ul> 2.6.1 Geometria do cordão de solda.	
<ul> <li>2.5.1. Recuo Do Eletrodo</li> <li>2.5.2. Distância Bocal Constritor Peça, DBCP</li> <li>2.5.3. Corrente De Soldagem</li> <li>2.5.4. Taxa de Alimentação de Pó</li> <li>2.5.5. Gás de Plasma</li> <li>2.5.6. Gás de proteção</li> <li>2.5.7. Tecimento</li> <li>2.5.8. Velocidade De Soldagem</li> </ul> 2.6. RESPOSTAS DO PROCESSO <ul> <li>2.6.1 Geometria do cordão de solda</li> <li>2.6.2. Controle Da Diluição</li> </ul>	
<ul> <li>2.5.1. Recuo Do Eletrodo</li> <li>2.5.2. Distância Bocal Constritor Peça, DBCP</li> <li>2.5.3. Corrente De Soldagem</li> <li>2.5.4. Taxa de Alimentação de Pó</li> <li>2.5.5. Gás de Plasma</li> <li>2.5.6. Gás de proteção</li> <li>2.5.7. Tecimento</li> <li>2.5.8. Velocidade De Soldagem</li> </ul> 2.6.1 Geometria do cordão de solda <ul> <li>2.6.2. Controle Da Diluição</li> <li>2.6.3. Convexidade</li> </ul>	

2.7. SOLDAGEM DE REVESTIMENTO	29
2.7.1 Conceitos e definições	29
2.7.2. Princípios de operação	30
2.7.3. Características Geométricas Do Cordão	30
2.8. METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA	31
2.8.1. Central Composite Design (CCD)	33
2.9. MEDIDAS DE ADEQUAÇÃO DE MODELOS DE REGRESSÃO	36
2.10. REGRESSÃO ROBUSTA	36
3. MATERIAIS E METODOLOGIA	39
3.1. Materiais	
3.2. Equipamentos	40
3.3. Metodologia	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1. Parâmetros e níveis de trabalho	44
4.2. Modelagem Matemática das Respostas	48
4.3. Adequação e ajuste dos modelos	49
4.4. Análise Da Correlação Entre As Respostas	52
4.5. Análise dos Efeitos Principais e de Interações entre os fatores	53
4.6. Análise Superficial dos Depósitos	65
5. CONCLUSÕES	66
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

ANEXOS	71
ANEXO A – Matriz Experimental para os ensaios Exploratórios	71
ANEXO B - Aspectos superficiais observados nos experimentos definitivos	72
ANEXO C – Geometria e Interface metal de base/ Revestimento observados	
nos experimentos definitivos	78
ANEXO D - Cálculo da Diluição – 1 seção transversa	82
ANEXO E – Medição do Reforço	83
ANEXO F– Medição da Largura e Índice Convexidade	85
ANEXO G – Medidas dos parâmetros Elétricos e Energia de Soldagem	86
ANEXO H – Testes de Normalidade para as respostas	87
ANEXO I – Análise Residual	97
ANEXO J - Esquema de ligação da fonte de soldagem e dos periféricos do proce	SSO
PTA - P	98

## 1 INTRODUÇÃO

#### 1.1 Importância do tema

Os processos de soldagem são caracterizados pela sua natureza multivariada, fato comprovado pela grande quantidade de critérios de qualidade exigíveis em sua aplicação. Uma das indústrias que apresenta o maior grau de exigência é a de exploração e produção de petróleo e gás, intensificado pelas constantes descobertas de reservas em águas cada vez mais profundas. Equipamentos e tubulações *offshore* que trabalham sob condições severas como altas temperaturas e presença de gases agressivos, agregadas a baixa qualidade do petróleo nacional estão sujeitos a constante degradação, acentuada pelos efeitos sinérgicos de natureza química. Portanto, a busca por materiais e processos que efetivamente contribuam para extensão da vida útil desses componentes, ou mesmo atue na recuperação dessas superfícies afetadas mostra-se um dos desafios da indústria nacional.

Nesse aspecto é comum a fabricação de material menos nobre como o aço C-Mn e baixa liga com posterior revestimento com materiais resistentes à corrosão apenas onde o contato direto com meio de degradação acontece, já que o elevado custo torna inviável a fabricação de componentes maciços por eles constituídos.

As ligas de níquel, em especial a liga Inconel 625, representam uma gama de materiais que apresentam excelente resistência a corrosão.

Revestimentos por soldagem garantem a fusão mútua e formação de ligações químicas entre o revestimento e o substrato, garantindo maior resistência ao desplacamento quando comparado a aspersão térmica, além de menor quantidade de defeitos, como porosidade, melhores propriedades mecânicas e anti-corrosivas do revestimento.

Não obstante, revestimento por soldagem de aplicados na recuperação de superfícies danificadas e ou degradadas permite a recuperação das dimensões do componente de acordo com o estabelecido no projeto.

## 1.2. Objetivos

- Estabelecer um estudo do processo de soldagem PTA-P através do Planejamento de Experimentos acoplados a metodologia de Superfície de Resposta e avaliar quais parâmetros exercem maior influência sobre as respostas analisadas.
- Fazer depósitos que permitam geometrias de cordões adequadas, reforços acima de 4 mm; boas características na interface com o revestimento, níveis de Diluição abaixo de 5%; elevada produtividade, rendimentos de deposição acima de 90% e isenção de defeitos de superfície.
- 3. Assegurar níveis de convexidade que permitam a sobreposição adequada.
- 4. Mostrar que a proposta de utilização de estatística robusta, através dos *M*estimator de Huber, para análise dos modelos de regressão mostrasse mais eficaz do que a abordagem comumente usada de mínimos quadrados, devido a presença de *outliers*.
- 5. Mostrar que o processo PTA-P contraria a norma que rege os revestimentos dissimilares a base de níquel: PETROBRAS N-1707 em dois requisitos:
  - a. Necessidade de soldagens com dois ou mais passes;
  - Reforços para o revestimento finais acima de 3 mm, contabilizados a partir da interface com o metal de base.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 2.1. Considerações iniciais

Este capítulo tem o objetivo de apresentar os conceitos que compõem o suporte teórico deste trabalho. Este tópico abrirá uma introdução ao assunto de superligas e superligas a base de níquel. Serão abordados os parâmetros do processo de soldagem plasma pó e seus respectivos conceitos. Em relação à soldagem de revestimento de aços carbono a discussão de tais ideias é importante para que as características desse processo sejam bem conhecidas, bem como suas aplicações, vantagens e desafios. Da mesma forma se levantará conceitos no que tange as ferramentas estatísticas utilizadas: Planejamento de Experimentos, Metodologia de Superfície de Resposta e Estimadores-M.

#### 2.2. Superligas

As superligas constituem o domínio de materiais com alta performance, caracterizando-se por exibir alta resistência mecânica e a corrosão em temperaturas elevadas (maiores que 650°C), além de resistência à fluência, baixa expansão térmica, resistência a fadiga térmica e mecânica e boa ductilidade (BALDAN, 2009).

A grande utilização de ligas resistentes à corrosão compreende as indústrias petroquímicas e químicas, aeroespacial, de geração de energia elétrica e automotiva, na qual concentra aplicações onde os equipamentos estão sujeitos a degradação de meios agressivos.

A maior parte das ligas para revestimentos tem como elemento de base o níquel, o cobalto e o ferro. No presente trabalho é dado enfoque apenas à superliga a base de níquel, o INCONEL 625.

#### 2.2.1. Superligas de Níquel

As superligas à base de níquel constituem o grupo mais importante dessa classe de materiais. O elemento Níquel é constituído por estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), utilizada em ligas ferrosas e não ferrosas. Em quantidades suficientes, ele estabilizará a austenita, fazendo a liga possuir boas propriedades mecânicas e resistência à corrosão (ASM, 2000).

O baixo coeficiente de expansão térmica exibida pelas ligas de níquel contribui para minimizar as tensões térmicas, minimizando assim a ocorrência de empenamento e fadiga térmica (ASM, 1993). Todavia, para aplicações industriais na forma de revestimento sobre aços, esta condição é crítica, porque pode causar um gradiente de expansão térmica, gerando elevados níveis de tensões, podendo ocasionar problemas de fadiga térmica (SILVA 2010).

Apesar de possuírem características semelhantes, o níquel e o ferro apresentam diferentes estruturas cristalina. O que torna a metalurgia do níquel e de suas ligas diferente das ligas de ferro, permitindo uma grande versatilidade na elaboração de ligas com composições químicas variadas, garantindo boa resistência mecânica e à corrosão e elevada resistência ao desgaste em condições de elevadas temperaturas (ASM, 1990; ASM, 1993a).

## 2.3. PROCESSO DE SOLDAGEM POR PLASMA

O Processo de soldagem Plasma (Plasma Arc Welding - PAW) consiste em um processo de soldagem a arco elétrico com presença de gás de proteção, onde a coalescência do metal ocorre através da transferência de calor oriundo do arco gerado entre um eletrodo de tungstênio e o metal de base. Como o arco está constringido pelo bocal constritor este se encontra com diâmetro reduzido, proporcionando grande concentração de energia, o que caracteriza esse processo. O arco voltaico gerado é sustentado pela ionização de um gás a alta temperatura chamado Plasma.

O PAW é derivado do processo de soldagem GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) mas com maior densidade de energia, resultado da constrição do arco pelo bico constritor, conseguindo maiores temperaturas em regiões mais afastadas da tocha.

Na soldagem a arco plasma são utilizados dois fluxos de gases, iguais ou diferentes. O gás de plasma percorre o envolto do eletrodo dando origem ao plasma. Este gás sai por um orifício no bocal constritor na forma de um jato de gás fortemente aquecido. O outro fluxo de gás, que tem a função de proteção do arco e da poça de fusão, percorre uma região entre o bocal constritor e o bocal externo, concêntrico a este. Frequentemente o argônio (Ar) é utilizado como gás de Plasma; e gás inerte ou uma mistura de gases como gás de proteção. A Figura 2.1 ilustra o arranjo de uma tocha de soldagem a plasma.



Figura 2.1 Ilustração de uma tocha de soldagem a plasma (adaptado de DÍAZ, 2005).

Os equipamentos básicos do processo Plasma é composto por uma fonte de soldagem, um módulo plasma, uma tocha plasma, fonte de gás de proteção e gás de plasma.

Existem basicamente duas variações do processo a arco Plasma, são eles: o arco transferido e o arco não transferido. O primeiro é estabelecido entre o eletrodo e a peça e o segundo entre o eletrodo e o bocal constritor. O calor necessário para fundir a peça e o metal de adição é proveniente apenas do gás de plasma.

## 2.4. O PROCESSO DE SOLDAGEM PTA-P

O processo Plasma com Arco Transferido – PTA é um processo de soldagem utilizado essencialmente para revestimentos de superfícies, com pó metálico como material de adição, ocorrendo a fusão e diluição do metal de base. As nomenclaturas PTA-A, Processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Arame e PTA-P, Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó foram propostas por (DÍAZ, 2005) para diferençar entre o processo de soldagem com alimentação de arame e pó respectivamente.

Nos dois processos de soldagem são utilizados eletrodo de tungstênio não consumível localizado no interior da tocha, um bico constritor refrigerado a água, gás de proteção para a poça fundida e gás de plasma.

O eletrodo de tungstênio não consumível, que permite a condução de corrente elétrica até ao arco de soldagem, se localiza no interior do bico constritor cuja base restringe as dimensões do arco transferido concentrando a energia em uma coluna de plasma. O gás de proteção flui em um anular entre o bico constritor e o bocal que o envolve, protegendo a região de solda da ação da atmosfera.

Os componentes principais de um sistema PTA-P consiste em uma tocha de soldagem, alimentador de pó (ADP), uma fonte de soldagem, sistema de alimentação de gases e equipamento para movimentação da tocha.

## 2.4.1. Abertura do Arco

No processo TIG a abertura o arco é feita através do contato entre o eletrodo e o substrato, gerando uma região de ionização do gás de proteção suficiente para a iniciar o arco. No processo Plasma a abertura do Arco Transferido ou Arco Principal é realizada por meio de um Arco Piloto de menor intensidade formado entre o eletrodo e o bocal constritor, na qual utiliza uma fonte de energia adicional que produz pulsos de alta tensão em alta frequência, ionizando uma região entre esses componentes (DÍAZ, 2005).

O Arco Piloto gera um jato de plasma que em contato com o substrato atua como um condutor de elétrico, conectando o eletrodo à peça. Com uma diferença de potencial entre o eletrodo e a peça se estabelece o Arco Transferido.

Apesar de o Arco Piloto não influenciar diretamente na fusão do substrato, maiores correntes neste arco pode gerar maiores intensidades de energia transferida à peça através do gás e consequente influência no processo de fusão, e o Arco Piloto passa a ser designado Arco não Transferido (OLIVEIRA, 2001).

Como não há um arco elétrico entre o eletrodo e o substrato, sendo que o calor é transferido apenas pelo jato gás essa modalidade pode ser utilizada para processos envolvendo materiais não condutores ou que necessite de baixo aporte térmico.

O Arco Transferido produz um maior aporte térmico transferido à peça. A Figura 2.2 mostra o Arco Piloto e o Arco Principal.





## 2.4.2. Tocha

A tocha de soldagem consiste em um componente para a conversão de energia elétrica em energia térmica, necessária para a fusão tanto do metal de adição quanto do metal de base em um processo de soldagem. A tocha é dotada de um

sistema de refrigeração na qual é importante no que tange a redução do tamanho da tocha, possibilidade se utilizar maiores correntes e aumentar a vida dos componentes; e orifícios por onde o metal na forma de pó percorre sua trajetória até a poça de fusão.

A literatura mostra ainda tipos de injeção de pó externa, interna e central (DÍAZ, 2005; SILVA, *et al*, 2012). Eles mostram que para a injeção externa as partículas de pó percorrem uma trajetória na qual parte dela é fora do arco. Além disso Díaz (2005) estudou ainda a influência do ângulo dos canais injetores com relação a base do bico constritor. Em seu trabalho ele testou ângulos de 30 e 60º (DÍAZ, 2005).

Na injeção interna o pó incide diretamente na região mais quente do plasma e acelerado a peça por ele (SILVA e DUTRA, 2012), que é promovida por um bocal focalizador. Na injeção central de pó é arrastado por um gás no interior do eletrodo. Isso evidencia que o tipo de injeção influencia na forma do arco.



Figura 2.3 - Corte transversal dos bicos constritores mostrando a entrada do fluxo de pó no arco plasma (adaptado de DÍAZ, 2005).

## 2.4.3. Alimentador de Pó (ADP)

O alimentador de pó é um aparato do processo de soldagem PTA-P onde o pó metálico é dosado de forma a se obter cordões de solda com as características

desejadas. Após sair do ADP o pó metálico é carreado de forma contínua até a tocha por um gás onde recebe o calor para sua fusão.

O ADP é constituído por um reservatório onde o pó metálico fica armazenado. Uma dosador promove a vazão em termos mássicos necessária de pó que percorre um mangueira até a tocha.

Estabelecer uma alimentação satisfatória com alto desempenho fora de posição é uma é um objetivo a ser alcançado, pois as partículas devem vencer a gravidade, além dos desafios característicos da soldagem fora de posição.

A ação da gravidade auxilia o transporte de pó, daí se instalar o ADP acima da tocha de soldagem. Para se evitar o entupimento das mangueiras deve-se evitar curvas em regiões de estagnação nas mesmas.

Industrialmente são encontrados transportadores de sólidos volumétricos e gravimétricos. O processo PTA-P utiliza os dispositivos volumétricos (SILVA e DUTRA, 2012) que trabalham em volume constate. Dentre eles existem os transportadores helicoidais, válvulas rotativas, mesa dosadora e válvulas gaveta.

## 2.4.4. Diâmetro do Orifício Constritor

O bico constritor, na qual o eletrodo de tungstênio fica confinado fixado concentricamente, possui um orifício circular central por onde o gás de plasma e o arco atravessam. O diâmetro do orifício constritor e o recuo do eletrodo influenciam na constricção do arco. Diâmetros de orifícios menores resultam em arcos mais constritos, o que influenciam na geometria do cordão de solda (DÍAZ, 2005).

## 2.5. PARÂMETROS DO PROCESSO

## 2.5.1. Recuo Do Eletrodo

A distância da ponta do eletrodo em relação a superfície externa do bico constritor denomina-se recuo. O recuo influência nas características do arco como o grau de

constrição, rigidez do jato plasma e sua densidade de energia. A Figura 2.4 mostra a influência do grau do recuo sobre a constrição do arco.

Para maiores valores de recuo obtêm-se um arco mais constrito e rígido, produzindo cordões mais estreitos, com maiores penetrações com consequente diluição mais acentuada. Segundo a literatura (SILVA, 2010), uma aumento do recuo gera um aumento na potência do arco obtendo cordões com essas características.

De acordo com o estudo de (OLIVEIRA, 2001), que em seu trabalho buscou também identificar a influência do recuo na tensão do arco no processo plasma de arco transferido alimentado com arame (PTAA), obtendo-se uma taxa média de variação de tensão de 2.4 V/mm, como mostrado na Figura 2.5.



Figura 2.4 - Influência do fator recuo do eletrodo sobre o grau de constrição do arco (adaptado de DÍAZ, 2005).



Figura 2.5 - Tensão do Arco em Função de Recuo para diferentes Distâncias Bico Constritor Peça (adaptado de OLIVEIRA, 2001).

## 2.5.2. Distância Bocal Constritor Peça, DBCP

A distância bico peça, DBCP, consiste na distância da face externa do bico constritor até a peça. A literatura diz que o processo de soldagem plasma tem pouca sensibilidade a mudança da DBCP. Isto é devido a forma quase cilíndrica do arco voltaico e ao baixo gradiente de energia ao longo da coluna de plasma, o que influenciaria pouco nas características geométricas do cordão.

DÍAZ (1999) mostra a variação da tensão no arco com a DBCP em seu estudo da soldagem por Plasma pela técnica Keyhole. Ele observou que maior DBCP induz maior tensão no arco. A Figura 2.6 mostra o parâmetro DBCP, e a Figura 2.7 o efeito da DBCP sobre a tensão no arco.



Figura 2.6 - Distância Bocal Constritor Peça (DBCP), Recuo do Eletrodo (Rc) e o diâmetro do bico constritor (adaptado de DÍAZ, 1999).



Figura 2.7 - Efeito do fator distância tocha-peça na tensão do arco (adaptado de DÍAZ, 1999).

#### 2.5.3. Corrente De Soldagem

A corrente em polaridade direta (CC-) é a mais utilizada em aplicações do processo Plasma, uma vez que a maior quantidade de calor gerada no arco é atingida no substrato, induzindo menor desgaste no eletrodo. Corrente com eletrodo positivo pode ainda ser usada em situações especiais, como na soldagem de titânio e zircônio. A polaridade inversa (CC+) é utilizada, em algum intervalo de tempo, para a remoção do filme de óxido refratário. Neste tipo de polaridade a maior quantidade de calor é gerada no eletrodo o que leva ao desgaste do mesmo. A corrente pulsada contínua ou alternada também são usadas.

#### 2.5.4. Taxa de Alimentação de Pó

No processo PTA-P o material de adição encontra-se na forma de pó metálico com uma granulometria adequada. As partículas deste metal empregadas normalmente são esféricas produzidas pelo processo de atomização. Diversas ligas podem ser empregadas, e ainda misturas destes pós podem ser feitas de modo a se obter cordões com características metalúrgicas e químicas desejadas.

Antes da soldagem recomenda-se aquecer o pó para retirar a umidade nele contido, pois pó úmidos podem causar entupimentos nas mangueiras de transporte e orifícios do bico constritor.

## 2.5.5. Gás de Plasma

O gás de plasma utilizado é um gás inerte alimentado com uma pequena vazão entre o eletrodo e o bocal constritor, saindo pelo orifício deste para formar o plasma. O argônio, utilizado normalmente como gás de Plasma, permite a abertura e transferência do arco voltaico com relativa facilidade, devido a seu baixo potencial de ionização. Também uma mistura de argônio com hidrogênio pode ser utilizada para promover um arco voltaico de maior energia e promover maior penetração (OLIVEIRA, 2001).

## 2.5.6. Gás de proteção

O gás de proteção tem a função de proteger a solda e o arco, podendo este ser inerte ou uma mistura de gases. Em muitas aplicações o gás de proteção é o mesmo utilizado como gás de plasma. Como gás inerte, o argônio pode ser usado como gás de proteção na soldagem de qualquer liga metálica e materiais reativos. O hélio também é utilizado como gás de proteção, porém seu alto custo é uma razão para sua baixa utilização. Além disso, o hélio promove uma maior tensão do arco o que dificulta a sua abertura.

## 2.5.7. Tecimento

O tecimento consiste em um movimento oscilatório realizado perpendicularmente à trajetória de deslocamento. Esse movimento permite redução no número de passes ou o preenchimento de juntas em um passe único. O tecimento pode ser do tipo trapezoidal, triangular e triangular com ou sem parada nos extremos. O sistema proporciona ainda a possibilidade de uma programação prévia das variáveis de cada passe.

Grande parte das aplicações PTA-P, como característica de revestimento utiliza soldas com tecimento. Desta forma a velocidade de soldagem pode ser considerada a velocidade transversal da tocha. Esta, para parâmetros usuais de tecimento, praticamente se iguala à velocidade real da tocha sendo substancialmente maior que a velocidade longitudinal (SILVA, 2010). A Figura 2.8 mostra alguns tipos de tecimento.



Figura 2.8 – Alguns tipos de tecimentos.

## 2.5.8. Velocidade De Soldagem

A velocidade de soldagem exerce efeito sobre a diluição, zona afetada pelo calor (ZAC), dureza e as características geométricas do cordão de solda. Apesar de que a velocidade de soldagem não é um fator que atua diretamente nas características do arco, ela está diretamente relacionada com a quantidade de calor transferido à peça por unidade de comprimento (DÍAZ, 1999).

De acordo com os resultados obtidos por Díaz (DÍAZ, 2005), altas velocidades de soldagem produzem cordões com menor diluição, menor profundidade da ZAC, menor penetração, e maior produtividade; porém menores reforços, e menores larguras. A Figura 2.9 ilustra as componentes da velocidade de soldagem.



Figura 2.9: Relação vetorial entre as velocidades de deslocamento longitudinal (V<sub>sold</sub>) e de oscilação (V<sub>osc</sub>), e a resultante transversal (V<sub>tr</sub>) com que a tocha se desloca.

A relação vetorial entre as velocidades de deslocamento longitudinal (V<sub>sold</sub>) e de oscilação (V<sub>osc</sub>), e a resultante transversal (V<sub>tr</sub>) com que a tocha se desloca é mostrada nas equações seguintes. A V<sub>osc</sub> é dependente dos parâmetros de oscilação (amplitude (A), frequência (f) e tempo de parada lateral (tpl). A Equação 2, obtida pelo teorema de Pitágoras, quantifica a relação entre as três velocidades envolvidas.

$$Vosc = 2fA/(1 - 2ftp)$$
(1)

$$Vtr^{2} = (\frac{2fA}{(1 - 2ftp)})^{2} + Vsold^{2}$$
 (2)

#### 2.6. RESPOSTAS DO PROCESSO

## 2.6.1 Geometria do cordão de solda

As grandezas geométricas de um cordão de solda consiste em reforço (r), largura (l), penetração (p), área fundida (AF) e área de depositada (AD). Essas características são mostrados na Figura 2.10.



Figura 2.10 - Parâmetros da geometria do cordão de solda.

## 2.6.2. Controle Da Diluição

A diluição é definida como a relação entre a área de penetração e a área total da seção transversal do cordão de solda. Um aumento da área de penetração gera um

aumento da diluição o que induz a difusão dos elementos químicos presente no metal fundido e de base. Maior a penetração maior essa difusão.

Na soldagem de revestimento o aumento da diluição, e consequentemente a difusão de elementos, se torna prejudicial a medida que os elementos presentes no substrato adentram a poça fundida empobrecendo o revestimento em elementos de liga, diminuindo assim a sua resistência a corrosão. Esse efeito provoca um gradiente na composição química no cordão ao longo da interface com o metal de base (SILVA *et al*, 2012). A agitação reduzida do metal fundido na interface com o substrato ainda sólido e o processo difusional são as razões possíveis para esse gradiente. A Figura 2.11 mostra a definição de diluição e o efeito difusional.

Como a diluição está relacionada a taxa de calor transferida à peça, esta é influenciada por parâmetros como corrente, tensão, velocidade de soldagem e recuo do eletrodo.

Valores baixos de diluição da ordem de 5 a 10% (DIAZ *et al*, 2011), muito inferiores a outros processos de soldagem (GOMES *et al*, 2011), em torno de 20 a 25%, constitui uma característica importante na soldagem de revestimento.



Figura 2.11 – Diluição e difusão entre os elementos do metal base e do metal de adição (adaptado de GOMES, 2010).

#### 2.6.3. Convexidade

Uma das formas de se medir a convexidade de um cordão é através do ângulo de concordância entre metal depositado e o substrato. A alta convexidade do cordão é prejudicial por impedir a adoção de cordões paralelos e sobrepostos, o que poderia causar falta de fusão. Uma medição da convexidade pelo ângulo se torna difícil. Para tanto, outro modo seria utilizar as dimensões lineares de "r" e "w" (reforço e largura), pois, de uma forma geral, pode-se esperar que quanto menor a relação r/w, menor será a convexidade do cordão. A relação entre o reforço e a penetração do cordão é definida como índice de convexidade (IC). Como orientação, procurou-se estabelecer padrões de qualidade aceitáveis onde índices de convexidade próximos de 15% são considerados adequados (SILVA et al, 2000). Um IC superior a 15% gera excessivo reforço com pequena penetração. A Figura 2.12 ilustra a secção transversal do cordão de solda para índices de convexidade diferentes.



Figura 2.12 - Representação da área da seção transversal do cordão de solda.

#### 2.6.4. Rendimento do processo e massa depositada

A determinação da quantidade de material efetivamente inserida na solda em relação à quantidade de material alimentado. O rendimento de deposição pode ser determinado mediante a seguinte expressão:

$$\eta_{\rm Tx} = ((m_2 - m_1)/m_{\rm ADP})^* 100 \ (\%) \tag{3}$$

Onde:

 $\begin{array}{l} \eta_{Tx}: \mbox{Rendimento de deposição} \\ m_2: \mbox{Massa da chapa depois do depósito} \\ m_1: \mbox{Massa da chapa antes do depósito} \\ m_{\mbox{ADP}}: \mbox{Massa de material de aporte fornecido pelo ADP} \end{array}$ 

A massa efetivamente depositada sobre o substrato designa-se massa depositada podendo ser expressa como a equação 4.

$$MD = m_2 - m_1 \tag{4}$$

## 2.7. SOLDAGEM DE REVESTIMENTO

## 2.7.1 Conceitos e definições

A soldagem de revestimento consiste na deposição de uma camada de metal de adição sobre a superfície de outro material com o objetivo de obter propriedades ou dimensões desejadas. Esses metais de adição são depositados com a finalidade de melhorar as propriedades de resistência à corrosão, resistência ao desgaste, resistência a altas temperaturas, aumento da dureza, controle dimensional ou para obtenção de algumas necessidades metalúrgicas. Basicamente, este processo é empregado quando se deseja uma das seguintes aplicações:

- Uso econômico de elementos de liga de custos elevados;

 Prorrogação da vida útil de peças que não possuem todas as propriedades necessárias para uma dada aplicação;

Criação de superfícies com características especiais;

- Recuperação de elementos afetados pelo desgaste ou corrosão;

## 2.7.2. Princípios de operação

O processo de revestimento ocorre de maneira que as camadas de revestimento sejam depositadas lateralmente e com um dado nível de sobreposição até que toda a região de interesse seja recoberta. O nível de sobreposição dos cordões depende da aplicação do revestimento e do processo de soldagem empregado. A Figura 2.13 ilustra esse processo.



Figura 2.13 – Princípio de operação da soldagem de revestimento

## 2.7.3. Características Geométricas Do Cordão

No que tange às características geométricas do cordão de solda a soldagem de revestimento difere da soldagem convencional. Em aplicações convencionais de soldagem, soldagem de união, deseja-se alta penetração para garantir a resistência mecânica exigida. Já para revestimento de superfícies buscam-se larguras elevadas, baixas penetrações, baixos percentuais de diluição, altos reforços, recobrindo a maior área possível em menor número de passes, obtidas pelo ajuste adequado dos parâmetros do processo (KEJELIN, 2012).

A norma Petrobras N-1707 (1999) infere que para revestimentos por deposição de solda para ligas de níquel o mínimo de espessura de 3,0 mm para o cordão de solda, depositado sem diluição.

# 2.8. METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas que são utilizadas para modelar e analisar problemas nos quais a resposta de interesse é influenciada por diferentes variáveis independentes (fatores de entrada). O modelo gerado é uma equação matemática que permite estimar o valor da resposta do processo em função das variáveis de estudo dentro da região de trabalho, na qual a variável de resposta deva alcançar um valor ótimo (MYERS *et al*, 1995).

Na maioria dos problemas de MSR, a relação entre as variáveis independentes e as respostas é desconhecida. Assim, intenta-se primeiramente encontrar a melhor aproximação para esta relação, utilizando normalmente polinômios de baixa ordem (primeira ordem). Todavia um polinômio de segunda ordem será necessário quando o processo estudado estiver relativamente próximo ao ótimo, devido à curvatura do processo. Na maioria dos casos um modelo de segunda ordem já é suficientemente adequado (MONTGOMERY, 1991).

Usualmente, representa-se uma superfície de resposta graficamente, conforme pode ser observado por um exemplo na Figura 2.14.



Figura 2.14 - Exemplo de gráfico de superfície de resposta para  $x_1$ ,  $x_2$ . (adaptado de NILO JÚNIOR, 2003).

Supondo que a resposta esperada E(Y) seja função de k variáveis preditoras codificadas x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>,...,x<sub>k</sub>, o relacionamento entre y e as variáveis preditoras pode ser expresso segundo uma expansão em Série de Taylor (BOX *et al*, 1987), tal que:

$$E(Y) = \eta = \eta_0 + \sum_{i=1}^{k} \left[ \frac{\partial \eta}{\partial x_i} \right]_0 x_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{k} \left[ \frac{\partial^2 \eta}{\partial x_i \partial x_j} \right] + \dots$$
(5)

Onde o subscrito zero indica a avaliação na origem. Ignorando os termos de alta ordem, a expansão reduz-se a:

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i \tag{6}$$

Se, em adição, forem mantidos os termos de segunda ordem, a aproximação se tornará:

(7) 
$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_i + \varepsilon$$

Se houver curvatura no processo, então um polinômio de ordem mais alta deve ser utilizado, tal como um modelo de segunda ordem, por exemplo.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_{j+} \varepsilon$$
(8)

Onde y representa a resposta, x a variável de entrada e  $\varepsilon$  o desvio aleatório do modelo. Os termos  $\beta$  representam os parâmetros que determinam o modelo e são chamados de coeficientes de regressão.

A Tabela 2.1 mostra as funções para modelos de primeira e segunda ordem com variáveis de entrada  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  e  $x_4$ .

ORDEM	FUNÇÃO
Primeira	$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{14} x_1 x_4 + b_{23} x_2 x_3 + b_{24} x_2 x_4 + b_{34} x_3 x_4$
Segunda	$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4$

Tabela 2.1 – Descrição das funções para modelos de primeira e segunda ordem.

Fonte: KEJELIN, 2012

Para se estimar os coeficientes ( $\beta$ ) do modelo polinomial, emprega-se o método dos mínimos quadrados.

Este planejamento é constituído por um fatorial completo, com  $2^4 = 16$  experimentos, que tem como função obter os termos lineares e de interação. Os oito pontos axiais fornecem os termos de segunda ordem e os sete pontos centrais, estimativas do erro experimental. As variáveis de entrada são codificadas de forma que as diferenças entre as unidades de medida não influenciem as respostas do modelo.

## 2.8.1. Central Composite Design (CCD)

O arranjo central composto (*Box-Wilson Central Composite Design - CCD*) é formada por três grupos distintos de elementos experimentais. Um CCD contém um fatorial completo ou fracionário, um design com um conjunto de ponto centrais (*center points*) e, adicionalmente, apresenta um grupo de níveis extras denominados de *Pontos Axiais*.

O planejamento composto central deve ser utilizado quando se queir verificar a existência de termos quadráticos no modelo de regressão; ou seja curvatura.

Se a distância entre o centro do arranjo e ponto fatorial (+1; -1) for aproximadamente 1 (em módulo), a distância do centro ao ponto axial será maior que a unidade. Esta distância, comumente representada por  $\alpha$ , depende de certas propriedades desejadas para o experimento e do número de fatores envolvidos (MONTGOMERY, 2001). A Tabela 2.2 ilustra os pontos fatoriais, axiais e centrais.
Pontos fatoriais	Pontos Axiais	Sobreposição do pontos fatoriais e axiais, com a adição de pontos centrais
Coordenadas : +1 e -1	Coordenadas: (+α,0); (-α,0); (0,+ α) e (0,- α).	Coordenadas do Ponto central: (0,0)

Tabela 2.2: Ilustração dos pontos fatoriais, Axiais e Centrais em um CCD.

Fonte: KEJELIN, 2012

O número de pontos axiais em um CCD é igual ao dobro do número de fatores e representam seus valores extremos, ou seja, de certa forma há uma extrapolação que permite um maior comportamento do modelo fora dos níveis determinados inicialmente.

Dependendo da localização dos *Pontos Axiais*, há três tipos de CCD: circunscrito (CCC), Inscrito (CCI) e Face Centrada (CCF). A distância α é dada pela equação 9 a seguir.

$$\alpha = (2^k)^{1/4} \tag{9}$$

Onde k é igual ao número de variáveis.

A Tabela 2.3 mostra os três tipos de CCD.

Тіро	Característica	Gráfico
Circunscrito (CCC)	É o CCD original. Nele, os pontos axiais estão a uma distância α do centro, baseado nas propriedades desejadas do projeto. Este arranjo requer cinco níveis para cada fator.	
Inscrito (CCI)	É adequado às situações nas quais os limites especificados não podem ser extrapolados. Neste caso, o CCI utiliza os níveis dos fatores como pontos axiais e cria um fatorial completo ou fracionado dentro desses limites. Um CCI requer cinco níveis.	
Face Centrada (CCF)	O arranjo de Face Centrada (CCF) caracteriza-se por dispor os pontos axiais sobre o centro de cada face do espaço fatorial, ou seja, $\alpha = +1$ ou -1. Requer três níveis para cada fator.	

Tabela 2.3:	Descrição	dos tipos	de CCD.
-------------	-----------	-----------	---------

Os do tipo CCC requerem 5 níveis para cada fator, bem como a extrapolação dos *Pontos Axiais* fora dos níveis +1 e -1, podendo-se dizer que fornecem uma boa qualidade na predição das respostas em todo o espaço experimental. O tipo CCI trabalha apenas dentro da amplitude dos níveis da parte fatorial, não apresentando a mesma qualidade na predição das respostas. Já o tipo CCF não exige a utilização de pontos além da amplitude dos níveis da parte fatorial e permite uma qualidade de predição dentro do espaço experimental relativamente alta. Entretanto, sua precisão na estimação dos coeficientes quadráticos puros é relativamente pobre, pois requer apenas três níveis para cada fator (KEJELIN, 2012).

Fonte: KEJELIN, 2012

# 2.9. MEDIDAS DE ADEQUAÇÃO DE MODELOS DE REGRESSÃO

O coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) é uma das medidas de adequação mais comum. Este termo representa o percentual de variação na resposta que é explicada pelo modelo construído. Associado a este coeficiente, encontra-se o R<sup>2</sup> ajustado (R<sup>2</sup> adjustado), que considera o fato de que R<sup>2</sup> tende a superestimar a quantidade atual de variação contabilizada para a população (PAIVA, 2006).

O valor de R<sup>2</sup> pode ser calculado aplicando-se a equação 10, tal que:

$$R^2 = \frac{SQ_M}{SQ_T} = 1 - \frac{SQ_E}{SQ_T} \tag{10}$$

O coeficiente de determinação ajustado (R<sup>2</sup> ajustado) é uma modificação que considera o número de variáveis incluídas no modelo.

Além disso, é necessária análise residual verificando a normalidade e aleatoriedade dos resíduos gerados. Utilizasse para isso o teste de Anderson Darling e observação da aleatoriedade dos resíduos.

# 2.10. REGRESSÃO ROBUSTA

Em análises experimentais, os dados obtidos podem não representar de forma confiável o fenômeno estudado e por isso, devem ser tratados como *outliers*. Estes pontos experimentais podem ocorrer devido a falhas de leitura, de captura de dados e semelhantes, gerando um efeito confuso sobre a interpretação dos resultados. Como mostrado por este trabalho, depois de determinar um projeto experimental e realizar experiências, procedesse a análise estatística, ajustando um modelo de regressão entre os fatores controláveis e as variáveis de resposta. Este modelo é geralmente construído pelos mínimos quadrados ordinários (*OLS*). Mas OLS básicas são muito sensíveis a presença de *outliers*. Assim, um método robusto ou um OLS modificado deve ser usado para diminuir essa sensibilidade.

Um dos métodos mais conhecidos são os Estimadores-M, propostos por (*Huber*, 1981) que se baseia numa probabilidade de máxima estimação (MLE). A idéia principal dos M-estimadores é substituir os resíduos quadrados por outra função. O M-estimador funciona através de um processo iterativo, alcunhado de mínimos quadrados redistribuídos, ou método IRLS (*Iteratively Reweighted Least Squares*). Logo, este método pode ser aplicado para estimar os coeficientes robustos de regressão.

Para compensar os efeitos dos valores discrepantes, removemos ou os modificamos por ponderação dos resíduos.

$$E(y_i) = \mu_i \Big(\beta_1, \dots \beta_p\Big) \tag{11}$$

Nesta equação,  $\mu_i$  é uma função definida por coeficientes desconhecidos ( $\beta_i$ ).

A resposta pode ser obtida a partir dos resultados exp, ...erimentais, e o modelo de regressão descreve a relação entre as variáveis e os esperados valores de y<sub>i</sub>.

Se todas as medidas são boas, então o método *OLS* fornece um modelo razoável e os coeficientes são estimados pela minimização da equação seguinte:

$$\left( y_1 - \mu_1 \left( \hat{\beta}_1, ..., \hat{\beta}_p \right) \right)^2 + ... + \left( y_n - \mu_n \left( \hat{\beta}_1, ..., \hat{\beta}_p \right) \right)^2.$$
 (12)

No entanto, se os resultados apresentam dados anormais, possivelmente consequência do comportamento residual nas experiências. Os coeficientes são determinados pela minimização da equação seguinte.

$$w_{1}\left(y_{1}-\mu_{1}\left(\hat{\beta}_{1},...,\hat{\beta}_{p}\right)\right)^{2}+... +w_{n}\left(y_{n}-\mu_{n}\left(\hat{\beta}_{1},...,\hat{\beta}_{p}\right)\right)^{2}$$
(13)

A anormalidade ocorre quando um resíduo comporta-se como um outlier.

Os valores para os pesos (wi) se baseiam nos resíduos definidos pela seguinte equação:

$$r_i = y_i - \mu_i \left( \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_p \right). \tag{14}$$

Para garantir a invariabilidade do estimador quanto à escala dos resíduos, o r<sub>i</sub> é dividido por 's ', estabelecendo uma escala robusta. O valor de 's' é dado por 1,4826 \*MAD (média dos desvios absolutos dos resíduos de sua mediana) e o valor de 1,4826 é um ajuste para o desvio padrão sob a distribuição normal.

Os pesos devem ser inversamente proporcionais aos valores dos resíduos  $w_i = c/r_i$ .

Ou seja, os resíduos com grandes valores são menos ponderados, produzindo melhores estimativas para os coeficientes.

Os pesos podem ser escolhidos por uma função como a função de Ponderação de Huber:

$$\begin{cases} w_i = 1 & if|r_i| < c \\ w_i = \frac{c}{|r_i|} & f|r_i| > c \end{cases}$$
(15)

Em suma,

- Compute os primeiros coeficientes do modelo de regressão, os resíduos e pesos,
- Calcule os novos coeficientes pela equação;
- Procedimento é repetido até que uma boa solução é obtida, porque os valores dos coeficientes, dos resíduos e pesos são diferentes;
- O procedimento termina quando a mudança na estimativa de uma iteração para em seguida é suficientemente pequeno;
- Este método iterativo é bom para modificar valores atípicos, mas as tendências de comportamento residual não são considerados.

#### **3. MATERIAIS E METODOLOGIA**

#### 3.1. Materiais

Neste trabalho foram utilizados metal de adição, metal de base, e gás de plasma, arraste e proteção. O eletrodo de tungstênio utilizado no processo foi do tipo toriado com diâmetro de 4,0 mm. O metal de base utilizado como foi o aço ASTM A36 em forma de barras. O metal de adição da liga à base de níquel Inconel 625 na forma de pó metálico. A composição química do metal de base é apresentada na Tabela 3.1 e a do metal de adição Tabela 3.2. Como gás de proteção, arraste e plasma foi utilizado o argônio puro com composição de 99,99%. A Figura 3.1 mostra a morfologia do pó de Inconel 625. As chapas de aço carbono ASTM A36 possuem dimensões 220x100x12.

Tabela 3.1 - Composição Química (%) do metal de base - ASTM A36.

ASTM A36	Ni	С	Cr	Fe	AI	Mn	Si
	0,02	0,23	0,02	Bal.	0,03	0,67	0,09

Fonte: ASM, 1990.

Ni	58,0 mín.	Si	0,50 máx.
Cr	20,0 - 23,0	Р	0,015 máx.
Мо	8,0 - 10,0	S	0,015 máx.
Fe	5,0 máx.	AI	0,40 máx.
Nb + Ta	3,15 – 4,15	Ti	0,40 máx.
С	0,10 máx.	Со	1,0 máx.
Mn	0,50 máx.		

Tabela 3.2 - Limites de composição química do Inconel 625 (%)

Fonte: ASM, 2000.



Figura 3.1 - Morfologia do INCONEL 625 atomizado (53 a 150 µm), por MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura).

# 3.2. Equipamentos

A execução dos experimentos foi realizada no Laboratório de Soldagem da Universidade Federal do Espírito Santo. A Figura 3.2 mostra os equipamentos utilizados, e a Figura 3.3 um destaque para o alimentador de pó e estufa.



Figura 3.2 - Equipamentos da bancada.

- 1 ADP Alimentador de Pó;
- 2 Tocha de soldagem PTA-P;
- 3 Tartílope V4 Oscilação da Tocha IMC Soldagem;
- 4 Fonte de soldagem IMC Soldagem;
- 5 Unidade de Refrigeração IMC Soldagem;
- 6 Gás de Proteção;
- 7 Controle do Tartílope;
- 8 Sistema de Aquisição de Dados SAP V428s. IMC Soldagem;
- 9 Corpo de Prova.



- 1 Reservatório;
- 2 Válvula rotativa;
- 3 Entrada de pó no ADP;
- 4 Saída de pó do ADP.







- 1 Tartílope;
- 2 Velocidade de oscilação da tocha;
- 3 Chapa de fixação;
- 4 Tocha;
- 5 Velocidade transversal da tocha.

Figura 3.3 - a) Destaque do ADP; b) Destaque da fixação do corpo de prova; c) Destaque do tartílope e tocha de soldagem; d) Estufa.

#### 3.3. Metodologia

Foram feitas simples deposições de um cordão de Inconel 625 com 110 segundos de arco aberto. O tecimento foi adotado e, para correta análise, toma-se a velocidade transversal do movimento como velocidade de soldagem. Após a obtenção dos cordões, as seções transversais para análise macrográfica foram retiradas a metade do cordão, a partir do início. Foram, então, lixadas com as lixas # 120 e # 600, atacadas com NITAL 10%. As imagens das seções transversais foram obtidas com auxílio de uma câmera de alta resolução e as respostas referentes a geometria do cordão obtidas. Os valores de reforço e largura foram medidos por um paquímetro antes do seccionamento, realizando-se 7 medidas ao longo do cordão. A Figura 3.4 descreve o procedimento utilizado para o registro das repostas referentes a interface de revestimento e geometria do cordão.



 $4^{\circ}$  D = [A<sub>2</sub> / (A<sub>1</sub> + A<sub>2</sub>)] x 100 Figura 3.4 - Procedimento para medição das respostas.

Para quantificar a massa depositada e o rendimento de deposição, as chapas de aço e a quantidade de pó inserida no módulo de alimentação do pó (ADP) foram pesadas. Neste equipamento, responsável pelo armazenamento e inserção do particulado no arco elétrico, adotou em todos os ensaios, massas entre 190 e 200 g. Assim, observou-se a massa depositada pela massa inicial e final no ADP. Com a pesagem antes e depois do corpo de prova pode-se determinar o rendimento do processo através da razão entre a massa depositada e a massa do material no ADP. Para tal procedimento foi utilizada uma balança de precisão com uma resolução de 0,001g.

A partir de análise na literatura notou-se escasso conteúdo na definição dos parâmetros mais importantes aplicados a este processo. Assim estabeleceu-se um experimento exploratório para definição das variáveis mais importantes. Para tanto foi realizado um planejamento fatorial fracionário com 23 experimentos, presente no Anexo A, cujas variáveis foram: o recuo do eletrodo, a corrente de soldagem, a taxa de alimentação, a distância bocal constritor peça (DBCP), a frequência de tecimento, a vazão de gás de plasma e de arraste.

# 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 4.1. Parâmetros e níveis de trabalho

Após a realização dos experimentos exploratórios constou-se que as variáveis que mais influenciavam no processo eram o recuo do eletrodo, a corrente de soldagem, a taxa de alimentação e a distância bocal constritor peça (DBCP). Desta forma esses parâmetros foram adotados como variáveis do processo, e os demais definidos como parâmetros fixos. A ANEXO J mostra o aspecto de alguns cordões obtidos nos ensaios exploratórios.

A Tabela 4.1 e 4.2 mostram os parâmetros fixos.

Fatores Fixos	Valor / Tipo Adotado
Material do Metal de Base	ASTM A36
Material do Metal de Adição	Inconel 625
Espessura do metal de Base	12.7 mm
Eletrodo de Tungstênio	AWS EWTh-2 / 4 mm
Posição de Soldagem	Plana
Ângulo da Tocha	90°
Tipo do Gás de Arraste, Plasma e Proteção.	Argônio 99,9%
V. soldagem	11 cm/min
V.tecimento	142 cm/min
Frequência de tecimento	0,6 Hz
Amplitude	15 mm
Tempo de parada	0,2 s

Tabela 4.1 - Parâmetros Fixos

Tabela 4.2 - Gases utilizados e suas vazões

Тіро	Valor (l/min)
Gás de Arraste	2.6
Gás de Plasma	2.4
Gás de Proteção	12

As respostas quantitativas analisadas foram divididas em três categorias mostradas na Tabela 4.3. Na Tabela 4.4 mostram os fatores e níveis de trabalho codificados.

Resposta	Categoria	Código	Unidade
Diluição	_	D	%
Penetração máxima	- Oualidade Interfacial	Р	mm
Área Fundida		Af	mm²
Área de Reforço		Ar	mm²
Largura do Cordão	- Coomotrio do Cordão do	W	mm
Reforço	Revestimento	R	mm
Índice de Convexidade		IC	%
Taxa de Deposição	Produtividade	TD	Kg/h
Rendimento de Deposição		η	%
Tensão Eficaz do Arco Elétrico	Arco Elétrico	V	Volts

Tabela 4.3 - Respostas Analisadas e suas Categorias

Fatores	Notação	Níveis Codificados				
		-2	-1	0	1	2
Corrente (A)	I	160	168	175	183	190
Taxa de alimentação (Kg/h)	Тх	3.47	3.79	4.17	4.61	4.85
Distância Bico de contato Peça (mm)	DBCP	16	18	19	21	22
Recuo (mm)	RC	1.8	2	2.4	2.7	3

Tabela 4.4 - Fatores e níveis de Trabalho codificados.

A matriz experimental adotada foi o arranjo composto central (CCD), contendo quatro fatores em dois níveis ( $2^{K} = 2^{4}=16$ ), oito pontos axiais (2k = 2.4 = 8), sete pontos centrais, totalizando 31 experimentos.

Após a medição de todas as respostas de interesse, estas foram reunidas para compor a matriz experimental, mostrada pela Tabela 4.5. Já na Tabela 4.6 encontram-se as medidas de posição e dispersão dos dados experimentais obtidos a partir da matriz experimental.

		Fa	tores						Respo	stas				
S	I	Тх	DBC	Rc	D	Р	Af	Ar	W	R	IC	TD	n	V
1	-1	-1	-1	-1	3.28	0.37	1.82	53.7	21.3	3.64	17.0	2.85	75.0	30.9
2	1	-1	-1	-1	9.92	0.82	5.64	51.2	21.8	3.63	16.5	3.10	81.7	31.6
3	-1	1	-1	-1	2.55	0.50	1.76	67.3	23.8	4.25	17.8	3.86	83.8	30.5
4	1	1	-1	-1	7.95	0.83	6.71	77.7	22.5	4.25	18.8	3.77	81.8	30.7
5	-1	-1	1	-1	9.51	0.78	6.39	60.8	22.8	3.80	16.6	3.49	92.1	31.6
6	1	-1	1	-1	14.8	1.01	10.1	58.3	23.4	3.85	16.4	3.48	91.8	31.9
7	-1	1	1	-1	3.70	0.34	2.63	68.4	23.9	4.38	18.2	4.05	87.7	31.4
8	1	1	1	-1	12.3	1.18	11.6	82.8	24.2	4.61	19.0	4.30	93.1	36.1
9	-1	-1	-1	1	9.66	0.84	6.67	62.3	22.5	3.81	16.8	3.48	91.9	30.2
10	1	-1	-1	1	13.8	0.99	9.22	57.1	22.8	3.77	16.4	3.46	91.3	31.2
11	-1	1	-1	1	4.07	0.57	2.86	67.3	23.2	4.52	19.4	4.08	88.4	30.4
12	1	1	-1	1	13.2	1.47	12.5	82.0	23.7	4.44	18.7	3.94	85.5	31.4
13	-1	-1	1	1	5.20	0.76	3.18	57.9	23.3	3.63	15.5	3.32	87.6	31.6
14	1	-1	1	1	16.4	1.32	11.5	58.9	23.1	3.91	16.9	3.43	90.4	33.1
15	-1	1	1	1	6.50	0.86	5.03	72.4	23.5	4.47	19.0	3.93	85.1	32.0
16	1	1	1	1	5.66	0.89	4.84	80.7	23.7	4.53	19.1	4.37	94.8	35.8
17	-2	0	0	0	6.06	0.53	4.21	65.3	22.5	4.06	18.0	3.70	88.7	27.9
18	2	0	0	0	12.8	1.36	11.0	74.4	23.6	4.08	17.2	3.81	91.2	30.4
19	0	-2	0	0	10.7	0.87	7.43	61.5	21.8	3.55	16.2	3.17	91.2	30.0
20	0	2	0	0	4.34	0.59	4.08	89.9	23.9	4.81	20.1	4.58	94.4	29.5
21	0	0	-2	0	12.4	1.10	10.4	73.7	23.3	4.17	17.8	3.71	89.0	28.2
22	0	0	2	0	3.39	0.69	2.60	74.1	22.2	4.44	19.9	3.89	93.4	31.3
23	0	0	0	-2	2.77	0.30	1.79	62.8	21.5	4.06	18.8	3.22	77.3	29.4
24	0	0	0	2	17.1	1.22	12.9	62.5	24.8	3.87	15.5	3.89	93.3	29.8
25	0	0	0	0	11.2	0.77	7.99	63.3	23.2	4.14	17.7	3.71	89.0	29.2
26	0	0	0	0	11.0	0.93	8.52	68.6	23.0	4.15	17.9	3.72	89.1	28.5
27	0	0	0	0	16.2	1.14	11.9	61.7	23.3	4.21	18.0	3.76	90.1	28.3
28	0	0	0	0	7.43	0.75	5.39	67.1	23.1	4.11	17.7	3.82	91.6	28.4
29	0	0	0	0	11.6	0.87	8.33	63.0	23.3	4.11	17.6	3.80	91.1	28.1
30	0	0	0	0	14.3	0.83	10.4	62.4	23.7	3.83	17.0	3.82	91.6	28.4
31	0	0	0	0	10.0	0.87	7.30	65.6	24.2	4.10	16.9	3.81	91.3	28.4

Tabela 4.5 - Matriz experimental com os resultados

Medidas		Respostas										
		D	Р	Af	Ar	W	R	IC	TD	η	V	
	Média	9.32	0.85	6.97	66.96	23.18	4.10	17.73	3.72	88.89	30.58	
FUSIÇAU	Mediana	9.92	0.84	6.71	65.34	23.33	4.11	17.78	3.77	90.44	30.49	
	Máximo	17.13	1.47	12.93	89.94	24.84	4.81	20.13	4.58	94.83	36.10	
	Mínimo	2.55	0.31	1.76	51.23	21.33	3.55	15.55	2.85	75.08	27.99	
	Amplitude	14.58	1.16	11.17	38.71	3.51	1.26	4.57	1.73	19.75	8.11	
Dispersão	Variância	20.35	0.09	12.78	81.54	0.66	0.10	1.46	0.14	22.69	4.03	
	Des.Padrão	4.51	0.30	3.57	9.03	0.81	0.32	1.21	0.37	4.76	2.01	
	Coef. Variação	48.42	35.23	51.31	13.48	3.52	7.84	6.80	9.97	5.36	6.56	

Tabela 4.6 - Medidas de Posição e Dispersão das Respostas.

## 4.2. Modelagem Matemática das Respostas

A partir dos dados experimentais apresentados pela Tabela 4.5, é possível estabelecer relações matemáticas entre as respostas analisadas e os parâmetros do processo. Utilizando o modelo de superfície de resposta de segunda ordem que representa a relação aproximada entre uma dada resposta de interesse e as variáveis de entrada. Dessa forma, considerando o processo abordado pelo presente trabalho, em que são estudados os efeitos de quatro parâmetros, pode-se escrever as respostas conforme indica a Equação 16 a seguir:

$$y = \beta_{0} + \beta_{1}I + \beta_{2}Tx + \beta_{3} DBCP + \beta_{4}Rc + \beta_{11}I^{2} + \beta_{22}Tx^{2} + \beta_{33} DBCP^{2} + \beta_{44} Rc^{2} + \beta_{12}ITx + \beta_{13}TxDBCP + \beta_{14}TxRc + \beta_{23}IDBCP + \beta_{24}DBCPRc$$
<sup>(16)</sup>  
+  $\beta_{34}IRc$ 

onde:

y - Resposta de interesse

 $\beta i$ ,  $\beta i j$ ,  $\beta i j$  - Coeficientes a serem estimados (i = 1, 2, 3, 4 e i < j)

*I* - Corrente de soldagem

Tx - Taxa de alimentação

Rc - Recuo do eletrodo

DBCP - Distância bocal constritor peça.

A estimativa dos coeficientes para regressão robusta foi feita através do software estatístico EVIEWS 8®, utilizando o Algoritmo estimador Iteratively Reweighted Least Squares (IRLS) para obter os M-Estimator e por consequência os coeficientes de regressão. Para estimativa do Modelo Não Robusto, o método de mínimos quadrados (OLS) foi utilizado. As Tabelas 4.7 e 4.8 apresentam os coeficientes estimados para os modelos quadráticos tanto para a modelagem robusta, quanto para modelagem de mínimos quadrados.

Castisiante					Respos	tas			
Coeffciente	Af	Ar	D	Р	W	R	TD	n	IC
Const	8.48	64.44	11.63	0.88	23.39	4.12	3.77	90.67	17.65
I	1.50	2.31	2.53	0.21	0.219	0.01	0.03	0.80	-0.09
Tx	-0.56	8.44	-1.61	-0.04	0.545	0.31	0.35	-0.07	1.00
DBCP	-1.11	1.01	-0.35	-0.01	0.243	0.06	0.06	1.29	0.02
RC	2.13	0.88	1.63	0.16	0.065	0.06	0.06	1.51	0.18
2	-0.27	0.77	-0.54	0.02	-0.122	-0.01	0.00	-0.12	0.01
Tx <sup>2</sup>	-0.73	1.79	-1.02	-0.03	-0.167	0.02	0.03	0.69	0.14
DBCP <sup>2</sup>	-0.56	1.64	-0.92	0.01	0.015	0.05	0.01	0.17	0.57
RC <sup>2</sup>	-0.34	-1.18	-0.41	-0.03	0.233	-0.09	-0.10	-2.51	-0.59
I*Tx	-0.91	3.54	-0.44	0.03	0.015	0.00	0.06	1.40	0.16
Tx*DBCP	-1.69	-0.12	-0.72	-0.07	-0.240	-0.01	0.02	0.48	0.01
Tx*RC	0.93	-0.36	-0.14	0.01	-0.283	0.01	0.02	0.48	0.07
I*DBCP	0.02	0.26	-0.02	-0.01	-0.053	0.02	0.06	1.30	0.05
DBCP*Rc	-1.38	-1.20	-1.56	-0.05	-0.108	-0.03	-0.09	-2.33	0.06
I*Rc	-0.09	-0.11	-0.23	-0.01	-0.067	-0.01	0.05	1.25	-0.16
R² Adj(%)	83.1	93.1	70.3	79.59	88.5	99.7	99.14	96.3	95.5
Erro Padrão	3.96	3.66	3.51	0.19	0.98	0.14	0.17	4.63	1.25

Tabela 4.7 - Coeficientes estimados para os modelos quadráticos por IRLS. M-Estimator de Huber Bisquare

\*Em negrito, os coeficientes estatisticamente significativos

# 4.3. Adequação e ajuste dos modelos

Para efetuar os ajustes dos modelos, o nível de significância adotado foi de 5%.

 $Af = 8.48 + 1.50^{*}I - 0.56^{*}Tx - 1.11^{*}DBCP + 2.13^{*}RC + 0.27^{*}I^{2} + 0.73^{*}Tx^{2}$ - 0.56^{\*}DBCP^{2} - 0.34^{\*}RC^{2} - 0.91^{\*}I^{\*}Tx - 1.69^{\*}Tx^{\*}DBCP + 0.93^{\*}Tx^{\*}RC + 0.02^{\*}I^{\*}DBCP - 1.38^{\*}DBCP^{\*}Rc - 0.09^{\*}I^{\*}Rc (17)

 $Ar = 64.44 + 2.31^{*l} + 8.44^{*Tx} + 1.01^{*DBCP} + 0.88^{*RC} + 0.77^{*l^{2}}$   $+ 1.79^{*Tx^{2}} + 1.64^{*DBCP^{2}} - 1.18^{*RC^{2}} + 3.54^{*l} + 1.7x - 0.12^{*Tx^{*DBCP}} - 0.36^{*Tx^{*RC}} + 0.26^{*l} +$ 

$$D = 11.63 + 2.53^{*} - 1.61^{*}Tx - 0.35^{*}DBCP + 1.63^{*}RC - 0.54^{*} - 0.54^{*} - 1.02^{*}Tx^{2} - 0.92^{*}DBCP^{2} - 0.41^{*}RC^{2} - 0.44^{*} - 0.72^{*}Tx^{*}DBCP$$

$$- 0.14^{*}Tx^{*}RC - 0.02^{*} - 1.56^{*}DBCP^{*}Rc - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^{*} - 0.23^$$

 $P = 0.88 + 0.21^{*}I - 0.04^{*}Tx - 0.01^{*}DBCP + 0.16^{*}RC + 0.02^{*}I^{2} - 0.03^{*}Tx^{2} + 0.01^{*}DBCP^{2} - 0.03^{*}RC^{2} + 0.03^{*}I^{*}Tx - 0.07^{*}Tx^{*}DBCP + 0.01^{*}Tx^{*}RC - 0.01^{*}I^{*}DBCP - 0.05^{*}DBCP^{*}Rc - 0.01^{*}I^{*}Rc$  (20)

- $W = 23.39 + 0.219^{*l} + 0.545^{*Tx} + 0.243^{*DBCP} + 0.065^{*RC} 0.122^{*l^2}$ - 0.167\*Tx<sup>2</sup> + 0.015\*DBCP<sup>2</sup> + 0.233^{\*RC<sup>2</sup>} + 0.015^{\*l\*Tx} - 0.240^{\*Tx\*DBCP} - 0.283^{\*Tx\*RC} - 0.053^{\*l\*DBCP} - 0.108^{\*DBCP\*Rc} - 0.067^{\*l\*Rc} (21)
- $R = 4.12 + 0.01^{*}I + 0.31^{*}Tx + 0.06^{*}DBCP + 0.06^{*}RC 0.01^{*}I^{2} + 0.02^{*}Tx^{2}$ + 0.05^{\*}DBCP<sup>2</sup> - 0.09^{\*}RC<sup>2</sup> + 0.00^{\*}I^{\*}Tx - 0.01^{\*}Tx^{\*}DBCP + 0.01^{\*}Tx^{\*}RC + 0.02^{\*}I^{\*}DBCP - 0.03^{\*}DBCP^{\*}Rc - 0.01^{\*}I^{\*}Rc (22)

 $TD = 3.77 + 0.03^{*} + 0.35^{*} Tx + 0.06^{*} DBCP + 0.06^{*} RC + 0.00^{*} l^{2} + 0.03^{*} Tx^{2} + 0.01^{*} DBCP^{2} - 0.10^{*} RC^{2} + 0.06^{*} l^{*} Tx + 0.02^{*} Tx^{*} DBCP + 0.02^{*} Tx^{*} RC + 0.06^{*} l^{*} DBCP - 0.09^{*} DBCP^{*} Rc + 0.05^{*} l^{*} Rc$  (23)

 $N = 90.67 + 0.80^{*} - 0.07^{*}Tx + 1.29^{*}DBCP + 1.51^{*}RC - 0.12^{*} + 0.69^{*}Tx^{2} + 0.17^{*}DBCP^{2} - 2.51^{*}RC^{2} + 1.40^{*} + 1.40^{*} + 1.40^{*} + 1.40^{*} + 1.40^{*} + 1.40^{*} + 1.40^{*} + 1.25^{*} + 1.40^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.25^{*} + 1.$ 

$$IC = 17.65 - 0.09^{*}I + 1.00^{*}Tx + 0.02^{*}DBCP + 0.18^{*}RC + 0.01^{*}I^{2} + 0.14^{*}Tx^{2}$$
(25)

Para confecção e análise das superfícies de respostas robustas foram utilizados os modelos completos. Tal procedimento foi adotado tendo em vista que os modelos reduzidos, compostos apenas pelos coeficientes estatisticamente significativos apresentaram valores para R<sup>2</sup> adjustado menores e Erro Padrão mais elevados em comparação aos modelos completos. Para ratificar a aplicabilidade satisfatória dos M-Estimadores, fez- se a análise residual presente no ANEXO I.

Coeficientes	Respostas								
	Af	Ar	D	Р	W	R	TD	n	IC
Const	8,56	64,60	11,70	0,86	23,47	4,09	3,78	90,60	17,58
I	2,32	2,37	2,64	0,22	0,14	0,02	0,04	0,99	-0,01
Tx	-	8,14	-1,64	-0,03	0,47	0,33	0,35	0,20	1,07
DBCP	-	0,93	-0,35	0,00	0,18	0,06	0,10	2,17	0,13
RC	1,31	0,75	1,64	0,16	0,36	0,01	0,12	2,50	-0,22
2	-0,30	0,61	-0,57	-	-0,07	-0,01	-0,02	-0,51	-0,04
Tx²	-0,76	2,06	-1,04	-	-0,12	0,02	0,01	0,20	0,10
DBCP <sup>2</sup>	-0,57	1,61	-0,96	-	-0,14	0,05	0,00	-0,21	0,28
RC <sup>2</sup>	-0,37	-1,18	-0,45	-	-0,05	-0,04	-0,07	-1,68	-0,14
I*Tx	-	3,56	-	0,04	-0,09	0,00	0,01	0,10	0,05
Tx*DBCP	-	-0,09	-	-0,06	-0,12	0,01	0,05	1,03	0,16
Tx*RC	-	-0,39	-0,29	0,00	-0,17	0,02	0,00	-0,05	-0,05
I*DBCP	-	0,25	-0,07	-0,01	0,06	0,05	0,01	-0,03	0,12
DBCP*Rc	-1,35	-1,20	-1,49	-	-0,23	-0,05	-0,03	-0,82	0,19
I*Rc	-0,07	-0,06	-0,14	-0,05	0,05	0,00	-0,10	-2,60	-0,06
R² Adj(%)	45,6	84,1	43,65	59,95	28,2	89,8	88,35	53,6	56,83
Erro Padrão	2,61	3,6	3,34	0,18	0,68	0,1	0,13	3,24	0,79

Tabela 4.8 - Coeficientes estimados para os modelos quadráticos por OLS.

Pela análise das tabelas 4.7 e 4.8 percebemos a nítida diferença entre os modelos de regressão utilizados. Observa-se que os ajustes utilizando mínimos quadrados, tabela 4.8, apresentam valores de R<sup>2</sup> adjustado abaixo do esperado comparados aos modelos de IRLS. Deve-se esse fato, a presença dos *outliers*. Tais valores

foram identificados pelo software MINITAB 16, ao proceder a regressão quadrática. Além disso, mesmo efetuando a redução do número de coeficientes, não houve alteração significativa nos ajustes e alguns como TD, n e IC apresentaram falta de ajuste significativo, *p-value* < 0.05.

Logo, para estabelecer a correta relação entre os fatores de entrada do processo e as respostas analisadas, optou-se pela utilização dos modelos robustos.

## 4.4. Análise Da Correlação Entre As Respostas

A partir da análise de correlação, Tabela 4.9 e das superfícies de respostas é verificado o efeito das interações produzidas pelas diversas variáveis. Pela significância das correlações, constata-se a existência de forte correlação da resposta entre P e D; Af e D; Af e P; R e Ar; Ic e Ar; TD e Ar; TD e W; Ic e R; TD e R; TD e Ic; e moderada entre Ic e D; W e P; W e Af; W e Ar; bem como entre R e W.

	D	Р	Af	Ar	W	R	lc	TD	n	V
Ρ	0.839									
Af	0.964	0.906								
Ar	-0.184	0.178	0.054							
W	0.342	0.429	0.442	0.427						
R	-0.296	-0.014	-0.100	0.861	0.445					
lc	-0.483	-0.238	-0.315	0.752	0.022	0.896				
TD	-0.072	0.139	0.098	0.826	0.729	0.878	0.642			
n	0.408	0.428	0.424	0.288	0.576	0.207	-0.042	0.546		
V	-0.064	0.197	-0.004	0.224	0.109	0.193	0.127	0.160	0.076	
pot	0.112	0.383	0.147	0.202	0.085	0.113	0.053	0.102	0.112	0.854

Tabela 4.9 - Matriz de Correlação das Respostas

(Coeficiente de Pearson; em negrito as correlações significativas, p-value<0.05)

### 4.5. Análise dos Efeitos Principais e de Interações entre os fatores

Segundo a Tabela 4.7 os fatores estatisticamente significativos para a diluição são corrente, taxa de alimentação e recuo, ou seja, apesar do modelo proposto ser de segunda ordem apenas fatores lineares se mostraram mais significativos, garantindo ajuste aceitável para o modelo.

De acordo com a Figura 5.1 observa-se um aumento da diluição como efeito da corrente do arco principal, estando de acordo com esperado e verificado por GEBERT *et al.*, (2006), uma vez que incrementos de tal fator produz um aumento energético e assim, maior aporte térmico para o sistema.

Efeito similar é observado para o recuo do eletrodo. Em relação a taxa de alimentação verifica-se que a partir do nível codificado (4,17 kg/h), os valores de diluição que antes estavam próximos a média são reduzidos, pois com a maior incidência de material, acredita-se que parte da energia do sistema seja direcionada à fusão do material adicionado, diminuindo assim o efeito da diluição.





Figura 5.1 - Efeitos principais sobre a diluição.

De acordo com a Tabela 4.7 os fatores estatisticamente significativos para a penetração máxima são corrente e recuo. Como para diluição, apenas fatores

lineares se mostraram mais significativos. Estes fatores influenciam positivamente nesta resposta. Como mostrado na Figura 5.2 com incrementos nos valores desses parâmetros a quantidade de calor transferida à peça é maior devido ao aumento da potência do arco. Para recuo observamos correlação positiva entre penetração e potência, bem como para esta última e a tensão do arco, confirmando o exposto pela literatura (SILVA, 2010).



Figura 5.2 - Efeitos principais sobre a penetração.

A Tabela 4.7 mostra os fatores estatisticamente significativos para a área fundida que são corrente, recuo, e os efeitos de interação entre taxa de alimentação e DBCP e recuo. A Figura 5.3 mostra que esta resposta é crescente com a corrente e o recuo. Diferentemente da diluição efeitos de interação se mostraram significativos. Por ocasião da crescente taxa de pó adicionada à poça de fusão ser suficiente para absorver maior quantidade de calor para sua fusão, sendo menos aportado à peça.



Figura 5.3 - Efeitos principais sobre a área fundida.

Da Tabela 4.7 podemos ver que os fatores estatisticamente significativos para a área de reforço são corrente, taxa de alimentação, os termos quadráticos de taxa e DBCP, além do efeito de interação entre corrente e a taxa de alimentação. Pela Figura 5.4 é perceptível que a área de reforço é grandemente afetada pela taxa de alimentação, o que podemos confirmar pela sua influência no modelo. Incrementos na corrente promovem maior calor gerado no arco e consequentemente maior a eficiência de fusão do pó metálico, resultando em menor perda de material, aumentando-se assim o reforço.

Ao analisarmos a matriz de correlação, ressaltamos a forte correlação entre Ar, IC e R. Essas respostas por sua vez recebem forte influência da Corrente do Arco Principal e do DBCP. Fisicamente, tal característica pode ser visualizada no Anexo C quando comparamos os experimentos 3 e 8. Incrementos simultâneos de ambos os fatores geram aumentos significativos das respostas supracitadas.



56

Figura 5.4 - Efeitos principais sobre a área de reforço.

De acordo com a Tabela 4.7 os fatores estatisticamente significativos para o reforço são taxa de alimentação, DBCP, recuo, os termos quadráticos para taxa de alimentação, DBCP e recuo, além dos termos de interação entre corrente e DBCP, e DBCP e recuo. Neste caso temos fatores lineares, quadráticos e de interação presentes como significativos. A Figura 5.5 mostra que maiores valores de taxa de alimentação resultam em crescentes reforços, o que era esperado. Para valores de DBCP acima de 18 mm verifica-se aumento do reforço. Isso ocorre devido a maior largura do arco junto ao corpo de prova induzindo a menor perda de pó, o que pode ser constatado pela correlação moderada positiva entre largura e reforço. Uma redução do reforço acontece para valores acima de 2.7 mm de recuo. Isso mostra que maiores valores deste parâmetro resultam em menor largura do arco junto a constrição do arco.



Figura 5.5 - Efeitos principais sobre o reforço.

A Tabela 4.7, os fatores estatisticamente significativos para a largura são corrente, DBCP, os termos quadráticos para taxa de alimentação e reforço, além dos termos de interação entre taxa de alimentação e DBCP e taxa e recuo. Neste caso temos fatores lineares, quadráticos e de interação presentes como significativos. Pela Figura 5.6 incrementos na corrente e no recuo proporcionaram um aumento da largura do cordão. Como já explicitado anteriormente esse crescimento justifica-se pelo aumento na potência e, por conseguinte uma maior conformação do cordão, proporcionando assim uma maior largura. Na mesma figura observa-se que com maior taxa de alimentação há um volume maior de material e por consequência, maior a largura do cordão realizado.



Figura 5.6 - Efeitos principais sobre a largura.

De acordo com a Tabela 4.7 os fatores estatisticamente significativos para o rendimento são corrente, DBCP, recuo, os termos quadráticos para taxa de alimentação e recuo, além dos termos de interação entre corrente e taxa de alimentação, corrente e DBCP, DBCP e recuo e corrente e recuo. Neste caso temos fatores lineares, quadráticos e de interação presentes como significativos. A Figura 5.7 mostra que com aumento do DBCP, ter-se-á uma maior volume de arco voltaico e com isso, a possibilidade de perdas do pó durante a alimentação diminui, devido à proximidade do ponto de incidência do pó. Com a variação do recuo, tem-se a variação na potência e, por conseguinte na eficiência de fusão do pó em alimentação. Logo, com o seu incremento, aumenta-se a eficiência do processo.

A largura e rendimento apresentam correlação positiva. Tal explicação se dá pelo aumento da fluidez e molhabilidade da poça de fusão, promovido pelo aumento da largura. Isso faz com que a região a ser atingida pelo pó seja maior, além da massa depositada. Esse efeito supracitado pode ser amplificado com incrementos de DBP. Tal comportamento deve-se ao maior aproveitamento do pó, influenciado pelo ponto focal de injeção do pó.



De acordo com a Tabela 4.7 os fatores estatisticamente significativos para o índice

De acordo com a rabela 4.7 os ratores estatisticamente significativos para o indice de convexidade são taxa de alimentação e os termos quadráticos para DBCP e recuo. Neste caso temos fatores lineares e quadráticos presentes como significativos apenas. Na Figura 5.8 podemos constatar que para o índice de convexidade um aumento na taxa de alimentação resulta em uma relação r/w crescente. Isso ocorre pois há uma aumento no reforço e, consequentemente, no índice de convexidade. Na mesma figura verifica-se que esta resposta sofre queda com o recuo, pois incrementos deste promove um aumento na largura do cordão, proporcionando maior molhabilidade. Pela Tabela 4.9 nota-se forte correlação positiva entre reforço e índice de convexidade, exibindo que um cresce quando o outro cresce, com recíproca verdadeira. Isso ocorre, pois o reforço é fortemente dependente da taxa de alimentação interferindo grandemente nessa resposta.

Para análise das interações, nota-se que a correlação positiva e forte entre o IC e a Área do Reforço permite menores valores de sobreposição dos cordões quando o revestimento for efetuado por completo. Esse resultado permitiria reduzir o número de passes para obtenção da mesma largura total de revestimento. No entanto, índice de convexidade elevado, segundo (SILVA, *et. al.*, 2000) pode ser prejudicial a

qualidade de cordões sobrepostos. A seção transversal para os cordões depositados podem ser visualizada no Anexo C.



Figura 5.8 - Efeitos principais sobre o índice de convexidade.

Na Tabela 4.7, os fatores estatisticamente significativos para a taxa de deposição são corrente, taxa de alimentação, DBCP, recuo, os termos quadráticos para taxa de alimentação e reforço, além dos termos de interação entre corrente e taxa de alimentação, corrente e DBCP, DBCP e recuo e corrente e recuo. Neste caso temos fatores lineares, quadráticos e de interação presentes como significativos. Observa-se pela Figura 5.9 que incrementos na taxa de alimentação aumentam a taxa depositada. Isso é explicado devido ao fato de um maior volume de material ser imposto a poça de fusão. Quanto ao recuo, a taxa de deposição cresce com o aumento deste fator, pois maior potência é gerada no arco e maior a eficiência de fusão do pó metálico.



Figura 5.9 - Efeitos principais sobre a taxa de deposição.

Pela análise das figuras 5.10 e 5.11 busca-se a conciliação entre produtividade e qualidade interfacial do depósitos, através das respostas TD, n, D e Af. Para isso, a taxa de alimentação foi mantida constante de forma a garantir valores de reforços aceitáveis independentemente de qualquer variação paramétrica, já o fator corrente de soldagem foi variado e essa variação somada as variações do Recuo e do DBCP nos fazem perceber algumas características importantes:

Em ambos os níveis de corrente, as variações de DBCP e recuo mostram que os mínimos valores de área fundida e diluição se dão quando os fatores DBCP e recuo estão em seus níveis mais baixos 16 e 1,8 mm, respectivamente. No entanto, para estes mesmos níveis, a taxa de deposição e o rendimento de deposição alcançam níveis mínimos, dentro do espaço experimental proposto.

Fisicamente, tais fenômenos podem ser explicados da seguinte forma:

Segundo SILVA, (2010) existe um ponto em que os jatos de pó se encontram durante a alimentação, chamado de ponto focal. Logo, baixos níveis de DBCP acarretam ponto focal localizado abaixo da superfície da peça promovendo maiores desvios. Em contraposição, à medida que se aumenta o DBP, como visto nas figuras 5.10 e 5.11, o ponto focal tende a se localizar sobre a poça, aumentado a massa depositada.

No entanto, para este trabalho esta teoria ganha um novo aspecto mediante a análise conjunta das superfícies de resposta. Percebe-se que os menores valores de TD e n ocorrem no ponto de DBCP e recuo iguais a -2. Logo, a teoria do ponto focal torna-se válida, mas agora a variável recuo exerce o mesmo efeito, quando mantemos o nível do DBCP fixo. Ou seja, incrementos de recuo permitem um aumento da produtividade a níveis excelentes. Em contrapartida, os níveis de diluição também aumentam consideravelmente, fato indesejável. Essa característica do recuo pode ser atribuída a sua correlação positiva com a potência do arco elétrico fazendo com que uma maior quantidade de pó seja fundida e dependendo da quantidade de material aportado, o calor ser usado para fundir o substrato e não o material de adição.

Para esta condição, a energia não utilizada para fusão do pó deveria ser utilizada para fundir o substrato, no entanto isso não acontece. Com o DBCP baixo, o pó que não é desviado passa curto espaço de tempo no arco e com isso, chegaria a poça com uma temperatura mais baixa "roubando" calor da mesma que somados ao fato do recuo em seu nível mais baixo introduzir menor constrição ao arco produz diluição baixa. A medida que o recuo aumenta, a constrição aumenta, o pó chega mais quente e com isso a diluição aumenta.

Se o DBCP estiver em seu nível mais elevado, e da mesma forma, incrementos de recuo forem dados as quatro respostas se comportam de forma diferente do primeiro caso, possuem viés de queda. Para a diluição, a redução dos valores ainda não atende os objetivos traçados por esse trabalho, valores abaixo de 5%.

As variações nos níveis de corrente promovem a translação vertical das superfícies de resposta.

Foram propostas variações da taxa de alimentação e corrente, mas não foram obtidos resultados satisfatórios. Em alguns casos a diluição e área fundida alcançaram valores negativos, o que poderíamos intuir como falta de fusão, no entanto não houve comprovação quanto a tal suposição.

Segundo esta análise, para o nível de taxa de alimentação proposto. Não será possível obter simultaneamente níveis de diluição abaixo de 5% e produtividade alta mediante a variação da corrente, DBCP e Recuo.



Figura 5.10 - Superfícies de Resposta e efeitos de interação. (Para valores codificados de corrente = 2 e tx = 0).



Figura 5.11 - Superfícies de Resposta e efeitos de interação. (Para valores codificados de corrente = 1 e tx = 0).

## 4.6. Análise Superficial dos Depósitos

Um resultado importante obtido nesse trabalho é a conciliação de altos níveis de Corrente do Arco Principal sem afetar a qualidade superficial dos revestimentos, precisamente a ocorrência de Trincas, apontado por (HUANG, 1998) como um dos efeitos nocivos de altos níveis de Corrente do Arco Principal. Um fator que certamente contribuiu para esse resultado foi a introdução da oscilação da tocha nos testes. No entanto, não pode-se agregar a isso baixos valores de diluição, prejudicando as propriedades de interface revestimento/substrato.

Em nenhum dos testes definitivos foi detectado a presença de porosidades mostrando a eficácia da proteção gasosa e do efeito de constrição do arco, permitindo menores vazões de gases sem comprometer a qualidade da soldagem.

A utilização de argônio como gás de Proteção, de Plasma e Arraste mostrou-se eficiente no que tange a molhabilidade do cordão, já que dentre os gases comumente utilizados é o que apresenta menor condutividade térmica e maior densidade.

O aspecto superficial dos cordões pode ser visto no anexo B deste trabalho.

# 5. CONCLUSÕES

- Foi possível estabelecer o estudo e análise satisfatórios do processo PTA-P através de ferramentas estatísticas: DOE, Superfície de resposta e análise de correlação multivariada.
- A utilização de estatística robusta, através dos *M-estimator de Huber*, para análise dos modelos de regressão mostrou-se mais eficaz do que a abordagem comumente usada de mínimos quadrados.
- Através do método de regressão e metodologia de superfície de resposta, o processo pôde ser descrito e analisado de forma gráfica com nível de confiança garantido pelos elevados ajustes obtidos para cada modelo.
- É possível efetuar os depósitos com um único passe e obter espessuras elevadas, com reforços brutos de 4 mm. Isso contraria a norma PETROBRAS N-1707, para ligas de níquel na qual se exige soldagem *overlay* com 2 ou mais passes. Tal diretriz aborda os processos mais comumente utilizados como *GTAW cold wire, GTAW hot wire e GMAW,* como para esses processos a diluição resultante em um único passe é elevada, faz- se necessário aumentar a área do reforço com maior quantidade de material.
- A taxa de alimentação e o recuo do eletrodo são as variáveis mais importantes quando a exigência é recobrir a maior área possível do substrato com menor índice de diluição possível;
- Dentro do planejamento experimental proposto foi possível atender as exigências de geometrias adequadas para os cordões, reforços acima de 4 mm; boas características na interface com o revestimento, níveis de Diluição abaixo de 5%; elevada produtividade, rendimentos de deposição acima de 90% e isenção de defeitos de superfície como trincas e porosidades.
- Os níveis de convexidade obtidos estão dentro dos níveis de qualidade classificados pela literatura corrente como ótimos. Tal resultado permitirá adequada sobreposição na soldagem do revestimento completo.

O processo se mostra passível de ser estabelecido em detrimento a outros processos convencionais, uma vez que se estabelecem as premissas da norma em um único passe.

# 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

**ASM. 1990.** *Nickel and nickel alloys. In: Properties and Selection of Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.* 10.ed. Ohio : ASM International, 1990. pp. 950-994. Vol. 1.

**ASM. 1993**. Corrosion of nickel-base alloys. In: Corrosion. Ed. ASM International. Metals Park, Ohio, v.13, 10th ed., p. 641-657, 1993.

**BALDAN, R. 2009.** Processamento e Caracterização de Rotores Automotivos da Superliga MAR-M247. *Dissertação de Mestrado.* Lorena, São Paulo : EEL-USP, 2009. p. 117.

**BOX, G. E. P., DRAPER, N. R. 1987**, Empirical Model-Building and Response Surfaces, John Wiley & Sons, 1 ed., 650p.

**DÍAZ, V. M. V. 2005**, Inovação do Equipamento e Avaliação do Processo Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTAP) para Soldagem Fora de Posição. 2005, 198 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

**DIAZ, V. M. V. 1999**, Influência de parâmetros e variáveis da soldagem plasma sobre as características da solda com ênfase na análise da abertura e no fechamento do keyhole. 1999. 113f. Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

**DIAZ, V. V.; DUTRA, J. C. e D'OLIVEIRA. 2011**, A. S. S. C. M. Uma contribuição ao processo de soldagem plasma de arco transferido (PTA) para posições forçadas. Soldag. insp. (2011, vol.16, n.1).

**EVANGELISTA, E.; Mc QUEEN, H.J.; NIEWCZAS, M.; CABIBBO, M. 2004**, Hot Workability of 2304 and 2205 Duplex Stainless Steels. Canadian Metalhurgical Quarterly, 2004

**GOMES, J. H. F, 2010** - Análise E Otimização Da Soldagem De Revestimento De Chapas De Aço ABNT 1020 Com Utilização De Arame Tubular Inoxidável Austenítico - Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. 2010.

**GOMES, J. H. F.; COSTA, S. C.; PAIVA, A. P. e BALESTRASSI, P. P. 2011**.: Otimização de múltiplos objetivos na soldagem de revestimento de chapas de aço carbono ABNT 1020 utilizando arame tubular inoxidável austenítico. Soldag. insp. 2011, vol.16, n.3 pp.

**GRAF, K. 2004.** Estabilidade a Alta Temperatura de Revestimentos de Hastelloy C Depositados por PTA. Dissertação de Mestrado. Curitiba: UFPR, 2004. p. 99.

**GEBERT, A. et al. 1996** Plasma-Pulver-Auftragschweissen. Oberflächentechnik, n.1, p. 56-60. München, 1996.

**HUANG, X. et al.1998.** Applications of PTA Powder Welding in Petroleum Chemical Industry. Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference, p. 1013-1017. Nice, mai.1998

**KEJELIN, N. Z. 2012**. Soldagem De Revestimento De Aços Comuns C-Mn Com Superliga A Base De Níquel Inconel 625. Tese de Doutorado. Florianópolis: UFSC, 2012. p. 219

**MYERS, R. H., MONTGOMERY, D. C. 1995**, Re sponse Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Design of Experiments, 2 ed, Wiley – Interscience, New York, USA, 700p.

**MONTGOMERY, D. C. 2001**, Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, 5 ed., 699p.

NILO JUNIOR, 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 DE EXPERIMENTOS. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Itajubá. 2003.

**OLIVEIRA, M. A. 2001** Estudo do processo plasma com alimentação automática de arame. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis.

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

**PAIVA, A. P. 2006.** Metodologia de Superfície de Resposta e Análise de Componentes Principais em Otimização de Processos de Manufatura com Múltiplas

Respostas Correlacionadas – Tese de Doutorado, Itajubá, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, 257 p.

SILVA, R. H. G. e DUTRA, J. C. 2012. 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. Soldag. insp. 2012, vol.17, n.2.

SILVA, R. H. G. e DUTRA, J. C.2012. Processo PTA-P - Uma revisão da literatura como base para inovações: parte 2 de 2: Elementos Construtivos. Soldag. insp. 2012, vol.17, n.2,

**SILVA, R. H. G. 2010.** Inovações em Equipamentos e em Parametrização no Processo de Revestimento por Plasma-Pó (PTA-P). 2010. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

**SILVA, C.R. et. al., 2000.** "A quality and cost approach for welding process selection", Journal of the Braz. Soc. Mechanical Sciences, vol. XXII, no. 3, pp. 389-398.
#### ANEXOS

				Fate	ores					R	esposta	as		
S	Freq	Ι	Тx	RC	DBCP	plasma	Arraste	D	Р	W	R	IC	η	Td
1	0.5	175	4.2	2.4	19	2.5	3	4.30	0.43	22.7	4.20	18.46	93.6	3.95
2	0.3	160	3.8	3	16	3	3.5	6.03	0.72	20.9	3.72	17.74	93.8	3.21
3	0.3	160	4.5	1.8	22	3	3.5	0.27	0.11	20.8	4.11	19.70	92.1	4.11
4	0.7	190	4.2	3	22	3	3.5	3.64	0.85	23.7	4.26	17.98	91.5	4.34
5	0.3	160	3.8	1.8	16	2	2.5	3.35	0.30	22.4	3.86	17.21	90.6	3.15
6	0.5	175	4.2	2.4	19	2.5	3	3.81	0.76	22.8	4.24	18.54	93.6	3.64
7	0.5	175	4.2	2.4	19	2.5	3	8.56	0.67	22.9	4.11	17.88	88.4	3.46
8	0.7	160	3.8	1.8	22	2	3.5	3.42	0.24	22.9	3.24	14.17	86.3	3.26
9	0.7	160	4.5	1.8	16	3	2.5	4.64	0.52	23.8	4.36	18.26	82.6	3.57
10	0.5	175	4.2	2.4	19	2.5	3	6.22	0.52	22.5	4.33	19.16	88.8	3.43
11	0.5	175	4.2	2.4	19	2.5	3	6.08	0.68	23.5	4.25	18.05	90.8	3.70
12	0.3	190	3.8	3	22	2	3.5	13.04	0.84	22.8	3.97	17.37	89.7	3.37
13	0.5	175	4.2	2.4	19	2.5	3	9.91	0.99	23.4	4.26	18.15	89.2	3.54
14	0.7	190	4.5	1.8	22	2	2.5	4.71	0.44	22.3	4.58	20.53	89.7	3.87
15	0.7	160	3.8	3	22	3	2.5	7.53	0.65	23.9	3.72	15.56	88.0	3.27
16	0.7	190	3.8	3	16	2	2.5	24.98	0.21	23.3	3.73	15.94	89.9	3.21
17	0.3	190	4.5	3	16	3	2.5	20.04	2.06	23.7	4.66	19.62	89.5	3.74
18	0.3	190	4.5	1.8	16	2	3.5	7.32	0.90	22.7	4.42	19.42	82.1	3.59
19	0.7	190	3.8	1.8	16	3	3.5	11.04	0.72	22.4	3.29	14.67	74.1	2.82
20	0.3	160	4.5	3	22	2	2.5	5.43	0.37	22.26	4.60	20.66	86.5	3.93
21	0.7	160	4.5	3	22	3	2.5	2.71	0.45	22.96	4.02	17.50	78.6	3.51
22	0.3	160	3.8	1.8	22	3	2.5	1.99	0.21	22.20	3.68	16.56	81.6	3.23
23	0.5	175	4.2	2.4	19	2.5	3	2.63	0.50	22.18	4.10	18.48	83.5	3.33

## ANEXO A – Matriz Experimental para os ensaios Exploratórios

ANEXO B - Aspectos superficiais observados nos experimentos definitivos



Experimento 2

60

70

08

9.0

100

110

120

130

140 150

180

Experimento 3



Experimento 4







#### ANEXO B - Aspectos superficiais observados nos experimentos definitivos (cont.)

Experimento 7



Experimento 8



Experimento 9



Experimento 10



Experimento 11





ANEXO B - Aspectos superficiais observados nos experimentos definitivos (cont.)



ANEXO B - Aspectos superficiais observados nos experimentos definitivos (cont.)

2

Experimento 15



20

2

Experimento 13



50

Experimento 14

190

Experimento 19 Experimento 20 Experimento 21 Experimento 22 Experimento 23 Experimento 24 IU 0.9 0.8 

ANEXO B - Aspectos superficiais observados nos experimentos definitivos (cont.)

Experimento 25 Experimento 26 Experimento 27 II Experimento 28 Experimento 29 Experimento 30 -

#### ANEXO B - Aspectos superficiais observados nos experimentos definitivos (cont.)



ANEXO C – Geometria e Interface metal de base/ Revestimento observados nos experimentos definitivos.



Experimento 3



Experimento 2





Experimento 5











ANEXO C – Geometria e Interface metal de base/ Revestimento observados nos experimentos definitivos. (cont.)

Experimento 9



Experimento 11



Experimento 10





Experimento 13



Experimento 15







ANEXO C – Geometria e Interface metal de base/ Revestimento observados nos experimentos definitivos. (cont.)

Experimento 17



Experimento 19



Experimento 21



Experimento 23



Тордия

Experimento 18





Experimento 24



ANEXO C – Geometria e Interface metal de base/ Revestimento observados nos experimentos definitivos. (cont.)



Experimento 27



Experimento 28

1000 µm







Experimento 31





Experimento 26

## ANEXO D - Cálculo da Diluição - 1 seção transversal

$$Diluição(\%) = rac{Af}{Af + Ar}.100$$



					Área	Área de	
		Fato	res		Fundida (Af)	Reforço (Ar)	Diluição
S	I	Тx	DBCP	RC			
1	168	3.79	18	2	1.820	53.700	3.278
2	183	3.79	18	2	5.640	51.200	9.923
3	168	4.61	18	2	1.760	67.300	2.549
4	183	4.61	18	2	6.710	77.700	7.949
5	168	3.79	21	2	6.390	60.800	9.510
6	183	3.79	21	2	10.100	58.300	14.766
7	168	4.61	21	2	2.630	68.400	3.703
8	183	4.61	21	2	11.600	82.800	12.288
9	168	3.79	18	2.7	6.670	62.300	9.671
10	183	3.79	18	2.7	9.220	57.100	13.902
11	168	4.61	18	2.7	2.860	67.300	4.076
12	183	4.61	18	2.7	12.500	82.000	13.228
13	168	3.79	21	2.7	3.180	57.900	5.206
14	183	3.79	21	2.7	11.500	58.900	16.335
15	168	4.61	21	2.7	5.030	72.400	6.496
16	183	4.61	21	2.7	4.840	80.700	5.658
17	160	4.17	19	2.4	4.210	65.300	6.057
18	190	4.17	19	2.4	11.000	74.400	12.881
19	175	3.47	19	2.4	7.430	61.500	10.779
20	175	4.85	19	2.4	4.080	89.900	4.341
21	175	4.17	16	2.4	10.400	73.700	12.366
22	175	4.17	22	2.4	2.600	74.100	3.390
23	175	4.17	19	1.8	1.790	62.800	2.771
24	175	4.17	19	3	12.900	62.500	17.109
25	175	4.17	19	2.4	7.990	63.300	11.208
26	175	4.17	19	2.4	8.520	68.600	11.048
27	175	4.17	19	2.4	11.900	61.700	16.168
28	175	4.17	19	2.4	5.390	67.100	7.436
29	175	4.17	19	2.4	8.330	63.000	11.678
30	175	4.17	19	2.4	10.400	62.400	14.286
31	175	4.17	19	2.4	7.300	65.600	10.014



	Espessura da Peca								
S	M1	M2	M3	M4	, M5	M6	M7	Média	
8	12.79	12.87	12.83	12.83	12.89	12.87	12.90	12.87	
4	12.83	12.74	12.75	12.83	12.74	12.82	12.84	12.82	
18	12.75	12.70	12.71	12.85	12.83	12.84	12.86	12.83	
19	12.76	12.76	12.78	12.81	12.78	12.75	12.78	12.78	
31©	12.86	12.79	12.78	12.70	12.76	12.78	12.80	12.78	
17	12.74	12.80	12.76	12.77	12.81	12.82	12.88	12.80	
10	12.80	12.82	12.77	12.76	12.76	12.79	12.76	12.77	
30©	12.79	12.81	12.74	12.79	12.76	12.80	12.75	12.79	
24	12.83	12.80	12.91	12.87	12.88	12.80	12.81	12.83	
15	12.78	12.86	12.83	12.77	12.77	12.79	12.76	12.78	
20	12.79	12.71	12.76	12.78	12.84	12.85	12.83	12.79	
16	12.82	12.73	12.78	12.77	12.85	12.80	12.82	12.80	
22	12.82	12.85	12.81	12.80	12.81	12.80	12.80	12.81	
25©	12.77	12.83	12.93	12.82	12.79	12.80	12.73	12.80	
6	12.77	12.73	12.72	12.70	12.74	12.72	12.76	12.73	
29©	12.85	12.85	12.84	12.90	12.87	12.81	12.85	12.85	
11	12.91	12.90	12.73	12.81	12.80	12.89	12.78	12.81	
21	12.74	12.81	12.83	12.74	12.71	12.77	12.76	12.76	
23	12.82	12.89	12.78	12.80	12.79	12.77	12.76	12.79	
7	12.84	12.76	12.79	12.85	12.77	12.82	12.83	12.82	
26©	12.87	12.79	12.78	12.78	12.74	12.75	12.74	12.78	
28©	12.76	12.72	12.74	12.73	12.75	12.74	12.81	12.74	
12	12.72	12.72	12.73	12.75	12.74	12.70	12.70	12.72	
3	12.75	12.75	12.73	12.74	12.72	12.74	12.74	12.74	
27©	12.74	12.77	12.79	12.88	12.80	12.84	12.76	12.79	
9	12.88	12.80	12.81	12.80	12.82	12.80	12.86	12.81	
5	12.71	12.73	12.77	12.75	12.87	12.85	12.77	12.77	
14	12.78	12.75	12.72	12.74	12.89	12.77	12.79	12.77	
1	12.70	12.71	12.73	12.70	12.70	12.72	12.70	12.70	
13	12.77	12.75	12.76	12.74	12.76	12.78	12.78	12.76	
2	12.82	12.83	12.89	12.77	12.82	12.76	12.84	12.82	

			Espes	sura com (	Cordão			Espessura	Reforço
S	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	Média	Médio (mm)
8	17.17	17.14	17.34	17.42	17.46	17.33	17.41	17.34	4.47
4	16.55	16.45	16.45	16.55	16.51	16.42	16.43	16.45	3.63
18	16.83	16.96	16.93	17.02	16.87	16.81	16.91	16.91	4.08
19	16.25	16.37	16.38	16.37	16.33	16.30	16.30	16.33	3.55
31©	16.79	16.73	16.88	16.92	16.97	16.85	16.89	16.88	4.10
17	16.74	16.75	16.84	16.87	16.86	16.94	16.90	16.86	4.06
10	16.72	16.65	16.54	16.50	16.48	16.58	16.44	16.54	3.77
30©	16.78	16.70	16.61	16.62	16.58	16.57	16.62	16.62	3.83
24	17.04	16.71	16.72	16.67	16.70	16.68	16.59	16.70	3.87
15	17.71	17.39	17.63	17.23	17.48	17.18	17.35	17.39	4.61
20	17.86	17.58	17.51	17.50	17.60	17.74	17.60	17.60	4.81
16	17.30	17.36	17.33	17.33	17.31	17.35	17.24	17.33	4.53
22	17.54	17.36	17.23	17.28	17.25	17.15	17.19	17.25	4.44
25©	17.20	17.08	17.00	16.91	16.91	16.94	16.93	16.94	4.14
6	17.38	17.28	17.19	17.18	17.25	17.26	17.20	17.25	4.52
29©	17.19	17.02	17.01	16.93	16.96	16.93	16.86	16.96	4.11
11	17.12	16.66	16.67	16.66	16.40	16.57	16.65	16.66	3.85
21	16.90	17.30	16.93	16.94	16.83	16.93	16.94	16.93	4.17
23	16.91	16.82	17.01	16.87	16.85	16.70	16.51	16.85	4.06
7	17.37	17.20	17.23	17.23	17.17	17.08	17.19	17.20	4.38
26©	16.88	16.99	16.95	16.90	16.87	16.93	16.99	16.93	4.15
28©	16.84	16.93	16.92	16.84	16.85	16.87	16.71	16.85	4.11
12	16.79	16.61	16.62	16.63	16.67	16.61	16.64	16.63	3.91
3	16.75	16.64	16.54	16.55	16.42	16.46	16.36	16.54	3.80
27©	17.16	17.00	16.92	17.04	17.03	16.96	16.94	17.00	4.21
9	16.66	16.47	16.52	16.29	16.37	16.41	16.44	16.44	3.63
5	17.47	17.14	17.02	17.01	16.93	17.02	16.90	17.02	4.25
14	17.21	17.43	17.26	17.14	17.15	17.10	17.23	17.21	4.44
1	16.80	16.40	16.34	16.22	16.34	16.08	16.15	16.34	3.64
13	17.00	16.95	17.08	17.01	17.04	16.87	17.06	17.01	4.25
2	16.64	16.82	16.71	16.63	16.62	16.61	16.52	16.63	3.81

ANEXO E – Medição do Reforço (cont.)

## ANEXO F- Medição da Largura e Índice Convexidade

# $IC (\%) = \frac{Reforço Médio}{Largura Média}.100$

		Largura	IC (%)						
S	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	Média	
8	22.88	24.13	23.51	23.33	23.51	25.31	25.32	23.51	19.01
4	23.12	22.47	23.34	23.59	24.00	24.15	23.32	23.34	15.55
18	24.51	22.73	24.16	23.67	24.46	23.28	22.52	23.67	17.24
19	22.55	21.89	21.60	21.32	22.23	22.01	21.30	21.89	16.22
31©	24.30	22.87	24.35	24.25	25.36	23.52	23.53	24.25	16.91
17	23.31	22.99	22.11	22.51	22.48	22.50	21.48	22.50	18.04
10	22.88	23.06	22.82	22.50	22.75	23.19	23.10	22.88	16.48
30©	23.26	22.85	24.16	24.12	23.01	23.77	24.30	23.77	16.11
24	25.00	26.09	25.11	24.40	24.57	24.84	24.54	24.84	15.58
15	23.82	24.24	24.52	24.34	24.24	24.47	24.08	24.24	19.02
20	24.26	23.39	23.66	23.89	23.90	24.23	23.94	23.90	20.13
16	22.47	24.11	23.78	23.47	23.45	24.14	24.08	23.78	19.05
22	23.34	22.06	21.84	23.18	21.56	23.25	22.27	22.27	19.94
25©	23.28	23.04	23.19	23.30	23.29	23.42	23.51	23.29	17.78
6	22.79	23.32	23.01	22.84	23.21	23.49	23.52	23.21	19.47
29©	23.73	24.01	23.20	23.33	22.96	23.29	23.45	23.33	17.62
11	24.25	22.78	23.64	23.77	23.03	23.39	23.48	23.48	16.40
21	24.00	22.81	23.77	23.56	22.48	22.94	23.35	23.35	17.86
23	22.41	23.57	23.17	21.53	20.30	20.82	20.63	21.53	18.86
7	24.01	23.84	23.78	24.53	24.17	23.96	14.15	23.96	18.28
26©	23.09	23.07	22.60	23.77	23.44	23.43	22.79	23.09	17.97
28©	22.50	23.19	23.88	23.35	23.14	23.64	23.12	23.19	17.72
12	22.25	23.13	23.53	22.68	22.39	23.32	23.37	23.13	16.90
3	22.47	23.72	2.43	23.52	22.83	22.86	22.90	22.86	16.62
27©	23.37	22.26	23.10	23.02	23.36	23.95	23.52	23.36	18.02
9	22.77	21.20	21.88	21.60	22.27	21.77	22.68	21.88	16.59
5	23.80	21.86	24.43	23.70	23.80	23.73	24.16	23.80	17.86
14	23.19	23.69	23.75	24.35	23.42	24.43	23.72	23.72	18.72
1	21.33	21.41	22.12	22.29	20.03	19.95	19.96	21.33	17.07
13	22.53	22.38	22.05	22.35	22.50	23.18	23.25	22.50	18.89
2	22.39	22.31	22.58	22.78	22.89	22.20	22.87	22.58	16.87

#### ANEXO G – Medidas dos parâmetros Elétricos e Energia de Soldagem

$$U_{RMS} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{U_{i}^{2}}{n}} \qquad I_{RMS} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{I_{i}^{2}}{n}} \qquad P_{instRMS} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\frac{(U_{i} * I_{i})^{2}}{n})}$$

$$E = \frac{PinstRMS}{vsold}.rend.térmico$$

s	LIHM (A)	I RMS (A)	U RMS (V)	Potência Instantânea Eficaz (KW)	E* (Ki/cm)
1	168.00	165.57	30.9	4.99	1.05
2	183.00	175.01	31.6	5.54	1.17
3	168.00	165.29	30.5	5.06	1.07
4	183.00	175.52	30.7	5.40	1.14
5	168.00	165.27	31.68	5.24	1.11
6	183.00	175.83	31.96	5.62	1.19
7	168.00	165.21	31.46	5.20	1.10
8	183.00	175.50	36.1	5.50	1.16
9	168.00	165.55	30.28	5.01	1.06
10	183.00	175.94	31.25	5.50	1.16
11	168.00	165.27	30.45	5.03	1.06
12	183.00	175.88	31.41	5.52	1.17
13	168.00	165.24	31.65	5.23	1.10
14	183.00	175.71	33.17	5.83	1.23
15	168.00	165.24	32.07	5.30	1.12
16	183.00	175.90	35.82	6.30	1.33
17	160.00	156.91	27.99	4.39	0.93
18	190.00	182.61	30.49	5.57	1.18
19	175.00	171.48	30.03	5.15	1.09
20	175.00	171.64	29.53	5.07	1.07
21	175.00	171.68	28.26	4.85	1.03
22	175.00	171.64	31.37	5.38	1.14
23	175.00	171.65	29.45	5.05	1.07
24	175.00	171.32	29.84	5.11	1.08
25	175.00	171.51	29.27	5.02	1.06
26	175.00	171.02	28.5	4.87	1.03
27	175.00	170.90	28.38	4.85	1.02
28	175.00	168.78	28.41	4.80	1.01
29	175.00	168.83	28.17	4.76	1.00
30	175.00	168.93	28.45	4.81	1.02
31	175.00	168.96	28.45	4.81	1.02

\*Rend. Térmico PTA-P = 50%

















Teste de Normalidade - Largura







## ANEXO H – Testes de Normalidade para as respostas Nível de Confiança 95 % (cont)































# ANEXO I – Análise Residual Testes de Normalidade e aleatoriedade para os resíduos Nível de Confiança 95 % (cont)





### ANEXO J - Cordões dos experimentos exploratórios

Aspecto de alguns cordões obtidos nos ensaios exploratórios



