

**NACIONALGÁS** 

**BRASILGÁS** 

**PARAGÁS** 



# FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS IDEAIS DE SOLDAGEM USO EM VASOS DE PRESSÃO

**FORTALEZA**

**2020**

NACIONALGÁS 

BRASILGÁS 

PARAGÁS 



## DADOS DO CASE

### **Categoria:**

Infraestrutura

### **Autores:**

- Leonardo Magalhães Carvalho – Nacional Gás.  
Contatos: leonardo.magalhaes@nacionalgas.com.br  
(085) 3466.8921
- Manoel Soares de Lima Filho – Nacional Gás.  
Contatos: manoel.soares@nacionalgas.com.br  
(085) 3466.8951
- Thiago Alencar Luna Ferreira – Nacional Gás.  
Contatos: thiago.alencar@nacionalgas.com.br  
(085) 3466.7421
- Wildenberg Pereira Lucas – Nacional Gás.  
Contatos: wildenberg.lucas@nacionalgas.com.br  
(085) 3466.8921

## RESUMO

Os vasos de pressão são recipientes destinados a armazenar fluídos pressurizados. Durante a fabricação de vasos de pressão são utilizados, na maioria das vezes, chapas de aço que são unidas por processos de soldagem, fazendo com que esses processos de união de chapas sejam de grande importância para a construção desses vasos. No decorrer dos processos de soldagem são realizados testes exploratórios para determinar as faixas ideais dos parâmetros de tensão, corrente e velocidade de soldagem, de tal maneira que é necessário uma mão de obra qualificada para realizar esses teste, além de ocorrer um desperdício de matéria-prima e destinar uma quantidade considerável de tempo para determinar os parâmetros mencionados. Portanto, todos esses contratempos geram aumento de custos e do lead time para realizar tal operação. Logo, o presente estudo visa a obtenção dos parâmetros operacionais de trabalho do processo de soldagem de modo a obter valores desejados para os seguintes parâmetros resultantes: penetração, reforço e largura do cordão. De modo que, para obter os parâmetros resultantes foi gerado uma lista de combinações, com base em valores médios, dos parâmetros de tensão, corrente e velocidade de soldagem, em seguida foi realizado testes exploratórios e ensaios macrográficos para coletar os seguintes parâmetros resultantes do processo: penetração, reforço e largura do cordão. Logo após, foi aplicado uma análise de variância (ANOVA) e a técnica de superfície de resposta para gerar as superfícies quadráticas e as curvas níveis, onde foi possível localizar as regiões que maximizavam e minimizavam as variáveis resultantes do processo, além disso, foi observado que as grandezas tensão, corrente e velocidade de soldagem não eram completamente diretamente proporcionais as variáveis resultantes por causa da influência das demais variáveis no processo. De tal maneira que, com a determinação dos parâmetros de operação não será mais necessário realizar as soldagens exploratórias e por sua vez, resultará redução de custos já que não será destinado matéria prima para tal processo, além de ganho de tempo.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Representação esquemática de solda longitudinais e circunferenciais.....	9
<b>Figura 2</b> - Auto tanque utilizado para transporte de GLP. ....	10
<b>Figura 3</b> - Falha em um componente devido ao processo defeituoso de soldagem.....	12
<b>Figura 4</b> - Esquema de um processo de soldagem a arco submerso.....	14
<b>Figura 5</b> - Superfície quadrática descrita por uma equação que relaciona as variáveis independentes. ....	18
<b>Figura 6</b> - Plano descrito por uma equação que relaciona as variáveis independentes..	18
<b>Figura 7</b> - Fluxograma esquemático das etapas do método utilizado. ....	19
<b>Figura 8:</b> Ensaio macrográfico realizado em um dos corpos de prova.....	25
<b>Figura 9:</b> Ensaio macrográfico realizado em outro corpo de prova. ....	25
<b>Figura 10:</b> Diagrama de Pareto dos fatores que influenciam na variável penetração....	26
<b>Figura 11:</b> Modelo quadrático, expressão geral para duas variáveis. ....	27
<b>Figura 12:</b> Superfície quadrática formada pela combinação das grandezas tensão e corrente para análise da variável penetração.....	28
<b>Figura 13:</b> Análise da variável penetração a partir de curvas de níveis obtidas da superfície quadrática que relaciona tensão e corrente.....	29
<b>Figura 14:</b> Superfície quadrática formada pela combinação das grandezas corrente e velocidade de soldagem para análise da variável penetração.....	30
<b>Figura 15:</b> Análise da variável penetração a partir de curvas de níveis obtidas da superfície quadrática que relaciona corrente e velocidade de soldagem. ....	31
<b>Figura 16:</b> Diagrama de Pareto dos fatores que influenciam na variável reforço. ....	32
<b>Figura 17:</b> Superfície quadrática formada pela combinação das grandezas tensão e corrente para análise da variável reforço. ....	34
<b>Figura 18:</b> Análise da variável reforço a partir de curvas de níveis obtidas da superfície quadrática que relaciona tensão e corrente.....	35
<b>Figura 19:</b> Superfície quadrática formada pela combinação das grandezas corrente e velocidade de soldagem para análise da variável reforço. ....	36

**Figura 20:** Análise da variável reforço a partir de curvas de níveis obtidas da superfície de controle que relaciona corrente e velocidade de soldagem. .... 37

**Figura 21:** Diagrama de Pareto dos fatores que influenciam na variável largura do cordão. .... 38

**Figura 22:** Superfície quadrática formada pela combinação das grandezas tensão e corrente para análise da variável largura do cordão de solda..... 40

**Figura 23:** Curvas de níveis obtidas a partir da superfície de controle que relaciona tensão e corrente para análise da largura do cordão de solda. .... 41

**Figura 24:** Superfície quadrática formada pela combinação das grandezas corrente e velocidade de soldagem para análise da variável largura do cordão de solda. .... 42

**Figura 25:** Análise da largura do cordão de solda a partir de curvas de níveis obtidas da superfície de controle que relaciona corrente e velocidade de soldagem. .... 43

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1:</b> Valores médios utilizados para gerar a lista de combinações. ....	22
<b>Quadro 2:</b> Quadro de combinações entre os parâmetros independentes do processo de soldagem.....	23
<b>Quadro 3:</b> Relação entre os parâmetros independentes e dependentes obtidos após a soldagem exploratória. ....	24
<b>Quadro 4:</b> Tabela ANOVA para análise da variável penetração. ....	26
<b>Quadro 5:</b> Combinação de valores entre as variáveis corrente, tensão e velocidade de soldagem para análise da variável penetração.....	28
<b>Quadro 6:</b> Tabela ANOVA para a variável dependente reforço. ....	32
<b>Quadro 7:</b> Combinação de valores entre as variáveis corrente, tensão e velocidade de soldagem para análise da variável reforço. ....	33
<b>Quadro 8:</b> Tabela ANOVA para análise da variável largura. ....	38
<b>Quadro 9:</b> Combinação de valores entre as variáveis corrente, tensão e velocidade de soldagem para análise da variável largura de solda.....	39

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	8
1.1 HISTÓRICO DA NACIONAL GÁS DISTRIBUIDORA LTDA .....	8
1.2 CENÁRIO .....	9
<b>2. PROBLEMAS ENCONTRADOS</b> .....	11
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	12
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	13
4.1 INTRODUÇÃO À SOLDAGEM.....	13
4.2 SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO .....	13
4.3 VASOS DE PRESSÃO.....	14
4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	15
4.4.1 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS.....	16
4.4.2 ANÁLISE DE VARIÂNCIA – ANOVA .....	17
4.4.3 SUPERFÍCIES DE RESPOSTA .....	17
<b>5. MÉTODOS</b> .....	19
<b>6. RESULTADOS</b> .....	22
6.1 DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS MÉDIOS INICIAIS DE SOLDAGEM .....	22
6.2 CRIAÇÃO DE COMBINAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS DE SOLDAGEM.....	22
6.3 SOLDAGEM EXPLORATÓRIA .....	23
6.4 ANÁLISE DE CORPO DE PROVA.....	24
6.5 UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA DOE.....	25
<b>7. CONCLUSÃO</b> .....	43
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	45

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Histórico da Nacional Gás Distribuidora Ltda

A história da Nacional Gás se inicia em 1951, com um jovem empreendedor chamado Edson Queiroz que percebeu mudanças que estavam ocorrendo no mercado mundial na época e trouxe as mesmas para realidade dos cearenses. No início houve uma grande resistência da população devido ao receio do GLP, no entanto o jovem Edson conseguiu convencer a população de Fortaleza a deixar os antigos fogões a lenha pelos novos fogões que utilizavam o novo produto. No início a empresa teve enormes dificuldades, pois além do grande preconceito do povo nordestino com o produto, ainda era difícil a obtenção de GLP, pois o produto era importado do México e Estados Unidos e ainda existia a dificuldade de distribuição do mesmo. Para conseguir superar esses obstáculos foi preciso que o jovem empresário passasse a vender fogões, além de ter que ir pessoalmente nas casas dos clientes para fazer a instalação e informar sobre as vantagens dos novos produtos.

Em 1953, após uma ação arrojada, Edson Queiroz obteve a autorização para carregar seus botijões de gás na Refinaria Lanulfo Alves em Mataripe/BA. A partir desta concessão, a Edson Queiroz & Cia., que tinha 289 clientes e comercializava 2,9 toneladas por mês, a partir dessa ação foram reduzidos os custos para obtenção do GLP, conseguindo progressos significativos na distribuição. Por outro lado, o mercado continuava crescendo com a disruptiva do preconceito dos consumidores em Fortaleza. Foi quando a empresa iniciou um crescimento e ampliou para outros estados do Brasil, além deste fato, também se estendeu para outras atividades econômicas.

A Nacional Gás chega aos dias atuais com foco na modernidade, com destaque nacional na comercialização de envasados domiciliar e crescendo cada vez mais no setor granel, graças ao reconhecimento e preferência dos seus parceiros de negócios, clientes e consumidores. Atuando no armazenamento, envase e distribuição de GLP, está presente em quase todo o território nacional.

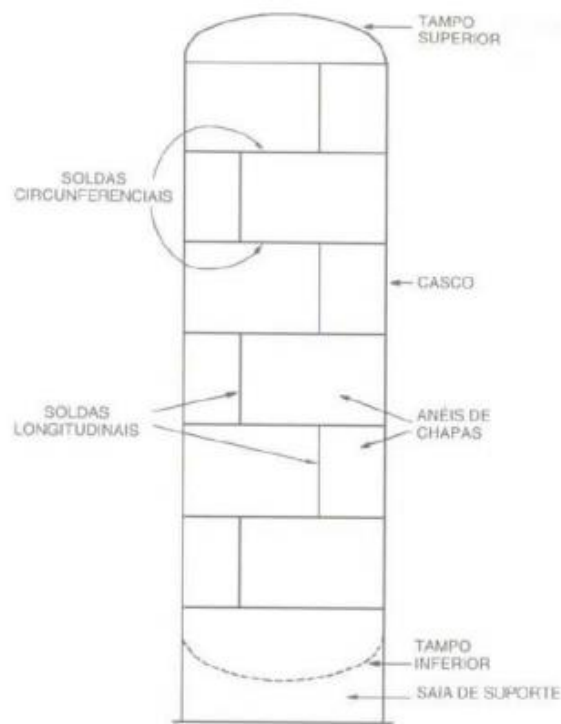




## 1.2 Cenário

A maioria dos vasos de pressão são fabricados a partir de chapas de aço ligadas entre si por processos de soldagem. Durante a construção de vasos de pressão é utilizado várias chapas calandradas unidas individualmente por soldas longitudinais e, em seguida é empregado a solda circunferencial para unir os anéis adjacentes. De tal maneira que, as soldas longitudinais entre duas chapas consecutivas devem estar espaçadas entre si, conforme pode ser visto na figura 1. Além de que, para os tampos cônicos também é utilizado chapas calandras com as soldas em posição longitudinal, enquanto para os tampos elípticos e torisféricos, dependendo do tamanho do diâmetro, é necessário que sejam fabricados de duas ou três chapas soldadas justapostas, com orientação secante ou contendo calota central e contendo vários gomos radiais. Durante a confecção desses vasos de pressão, o material mais utilizado é o aço-carbono sendo considerado material de uso geral. (TELLES, 1996)

**Figura 1** - Representação esquemática de solda longitudinais e circunferenciais.



Fonte: (TELLES,1996)

De tal modo que, os processos de soldagem são amplamente empregados para a fabricação de vasos de pressão, tendo em vista esse fato é necessário realizar ajustes no equipamento de solda de forma a utilizar corretamente as grandezas tensão, corrente e velocidade de soldagem, para obter os seguintes parâmetros resultantes ao fim do processo: penetração, reforço e largura de solda. A obtenção correta desses parâmetros resultantes possui o intuito de garantir a qualidade do equipamento e segurança aos indivíduos. Logo, é de extrema importância determinação desses valores dos parâmetros resultantes, porém esses parâmetros são determinados por meio de testes em corpos de prova, fazendo assim com que ocorra desperdício de recursos como matéria-prima e tempo. Os vasos de pressão são empregados no armazenamento e transporte do GLP figura 2, e tais equipamentos representam um alto custo inicial para as distribuidoras de GLP. Boa parte do custo agregado ao vaso de pressão está ligado ao processo de soldagem, onde esse processo necessita dos insumos como metal de adição, energia, fluxos, discos de corte, discos de desbaste e outros para ser executado. Com isso qualquer retrabalho representa um alto custo na fase de testes e fabricação.

**Figura 2** - Auto tanque utilizado para transporte de GLP.



**Fonte:** Elaborado pelos autores.

A Nacional Gás está sempre atenta para possíveis causas de insegurança em seus terminais, e utiliza de tecnologias avançadas e profissionais extremamente capacitados para prever possíveis sinistros que possam ocorrer. Diversos acidentes com vasos de pressão ocorreram ao longo da história, e muitos ligados a falha na soldagem dos equipamentos. Desta forma, o processo de soldagem deve garantir que os vasos de pressão estejam aptos a funcionar e dar segurança operacional. Com isso os parâmetros de soldagem devem ser muito bem definidos e testados, que sejam evitados os acidentes.

## **2. PROBLEMAS ENCONTRADOS**

Para a aplicação da soldagem a arco submerso em vasos de pressão, é necessário determinar uma faixa de valores apropriados de tensão, corrente e velocidade do processo, de tal maneira que é destinado uma quantidade considerável de tempo para determinar tais parâmetros, o que por sua vez acarreta em uma diminuição da produtividade e um aumento de custos com matéria prima, pois uma quantidade considerável de material base e insumos são destinados a execução dos testes. Esse tipo de ensaio utiliza mão de obra qualificada para execução, revisão de parâmetros e serviços para ensaios laboratoriais. Assim, existe um alto custo com mão de obra e contratação de serviço. De modo que, nos processos de soldagem executados comumente, existe um grande custo vinculado a necessidade de material base, insumos e mão de obra para qualificar um processo de soldagem. Esse custo está presente na fabricação, sendo incorporado e pago pela Nacional Gás no momento da aquisição dos equipamentos. Esses parâmetros por sua vez, influenciam na microestrutura da junta de solda, podendo aumentar a zona termicamente afetada e alterar de forma considerável as propriedades mecânicas do cordão de solda, diminuindo assim a resistência da junta. Também durante o processo de resfriamento da solda, ocorre uma contração no material devido a forças que atuam predominantemente na direção perpendicular ao cordão. Esse efeito, por exemplo, pode ser agravado quanto maior for a quantidade de material depositado. Logo, é necessário a que os parâmetros dos processos de soldagem sejam determinados de forma a evitar esses empecilhos. Esses fatos afetam diretamente a condição de operação do vaso de pressão em relação à segurança operacional, tendo em vista, que qualquer falha na determinação dos

parâmetros de soldagem afeta a qualidade da solda e conseqüentemente a integridade do vaso de pressão. A figura 3 demonstra a quebra de um equipamento devido a falha no processo de soldagem.

**Figura 3** - Falha em um componente devido ao processo defeituoso de soldagem.



**Fonte:** Elaborado pelos autores.

### 3. OBJETIVOS

Propor o desenvolvimento de parâmetros de soldagem a serem empregados na fabricação de vasos de pressão com o intuito de reduzir a quantidade de soldagem experimentais e, conseqüentemente, obter uma otimização do tempo, custos e garantir a qualidade da soldagem.

- Obter uma lista de combinações dos parâmetros de soldagem através do software STATISTICA;
- Executar soldagem exploratória com a combinação de parâmetros obtidos pelo software STATISTICA;
- Analisar os parâmetros da geometria da junta soldada: penetração, reforço e largura do cordão de solda, através de macrografias geradas pelo software Image Pro-Plus;

- Realizar estudo exploratório, com auxílio das ferramentas estatísticas fornecidas pelo software STATISTICA, de modo a obter os parâmetros adequados de soldagem por meio das informações da geometria da junta;

## **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1 Introdução à Soldagem**

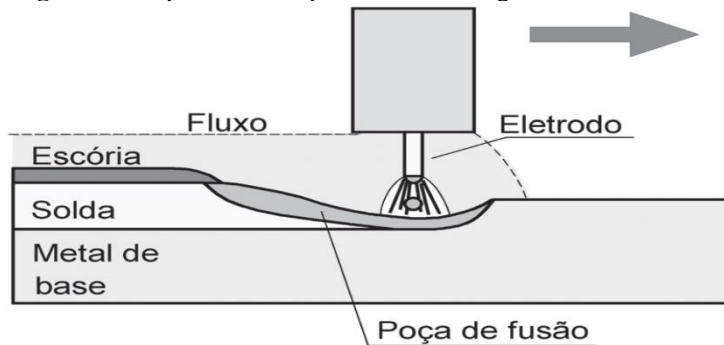
Soldagem é um processo de união de peças metálicas, utilizado desde a fabricação de peças simples como portões metálicos até aplicações complexas como a união de peças metalurgicamente incompatíveis através da energia liberada por uma explosão controlada. Os processos de soldagem são amplamente utilizados nas indústrias metalmeccânica, química, petrolífera nuclear e eletrônica. Os métodos de união de peças podem ser divididos em duas categorias baseadas na ação de forças macroscópicas e forças microscópicas. A união baseada na ação de forças macroscópicas consiste em utilizar um elemento de fixação como um parafuso ou rebite para realizar a união dos corpos e a resistência da junta será equivalente a resistência a cisalhamento do elemento de fixação, enquanto que a união baseada na ação de forças microscópicas consiste na formação de ligações químicas, especificamente as ligações metálicas entre as peças. Como exemplo desses métodos temos a soldagem e a brasagem. (VILLANI; MODENESI; BRACARENSE, 2016)

### **4.2 Soldagem a arco submerso**

A soldagem a arco submerso (Submerged Arc Welding – SAW) é o processo ao qual a energia requerida para fundir os materiais é oriunda de um arco que é gerado por um fluxo de corrente elétrica que se forma entre o arame de soldagem e o metal de base, tal processo pode ser verificado na figura 4. O arame de soldagem, o arco e a peça são cobertos na região de solda por um material granular fusível, chamado de “fluxo” que protege a solda da contaminação externa. (VILLANI; MODENESI; BRACARENSE, 2016)



**Figura 4** - Esquema de um processo de soldagem a arco submerso.



Fonte: (VILLANI; MODENESI; BRACARENSE, 2016)

Segundo Villani, Modenesi e Bracarense (2016) a soldagem a arco submerso se caracteriza pelas seguintes vantagens:

- Não há necessidade de equipamentos de proteção contra radiação pelo arco, uma vez que ele não visível;
- É um processo de soldagem estável, suave e que gera poucos fumos;
- Resulta em cordões com acabamentos superficiais uniformes;
- Elevada velocidade de soldagem;
- Maiores taxas de deposição;
- Melhor ambiente de trabalho e maior segurança para o operador;
- Permite soldagem circunferencial através de viradores, de modo que o processo é realizado sempre na posição plana;

Limitações da soldagem SAW:

- O processo é limitado as posições de soldagem plana e horizontal;

### 4.3 Vasos de pressão

Nome dado aos recipientes estanques que tem a finalidade de armazenar fluido pressurizado. Os gases são confinados sob forma liquefeita, pois nessas condições a massa específica do fluido aumenta consideravelmente, permitindo com que uma quantidade maior de matéria seja armazenada em um volume relativamente pequeno. Esse processo é economicamente viável quando se comparado com o armazenamento de fluido no estado gasoso, uma vez que nesse estado a massa específica do gás é menor, o

que implica que é necessário um volume consideravelmente maior para armazenar a mesma quantidade de fluido. Os vasos de pressão são utilizados nos seguintes segmentos: refinarias de petróleo, indústrias químicas e petroquímicas, indústrias alimentares e farmacêuticas, terminais de armazenagem e de distribuição de petróleo, bem como as instalações de gás de natural. Durante o processo de fabricação dos vasos de pressão é utilizado processos de soldagem para unir as chapas de aço. É obrigatório que as soldas de junção de chapas no casco e nos tampos dos vasos de pressão sejam de topo, com penetração total e de tipos facilmente radiografáveis. (TELLES, 1996)

Segundo Telles (1996), os vasos de pressão são classificados como:

➤ **Vasos não sujeitos a chama:**

- Torre de destilação fracionada;
- Esferas de armazenamento de gases;
- Vasos de armazenamento e de acumulação;
- Reatores diversos;
- Trocadores de calor;

➤ **Vasos sujeitos a chama:**

- Caldeiras;
- Fornos;

#### **4.4 Análise estatística**

A estatística consiste na utilização de técnicas para coletar, descrever, analisar e interpretar dados provenientes de experimentos ou de estudos observacionais. A análise estatística possui o objetivo de realizar tomadas de decisões, resoluções de problemas ou produção de conhecimento. Essas técnicas de coleta e análise de dados são amplamente utilizadas nas indústrias para encontrar uma relação entre níveis de fatores dos processos que possibilitam no aumento da qualidade de seus produtos ou serviços. (BARBETTA; REIS; BORNIA, 2004)



#### 4.4.1 Planejamento de experimentos

O DOE (a sigla do inglês “Desing Of Experiments” e traduzido para o português como “Planejamento de experimentos”) é uma abordagem estatística que possui amplas aplicações, especialmente no campo da ciência e da engenharia, sendo utilizada como ferramenta de gestão e como meio para otimizar e desenvolver processos, produtos e serviços. (PRASAD et al., 2012)

O planejamento de experimento consiste em realizar alterações propositas nos parâmetros de entrada com o intuito de observar e identificar as variações sofridas pelo parâmetro de saída. De um modo geral, para executar essa técnica é necessário percorrer as seguintes etapas: Reconhecimento e formulação do problema, escolha dos níveis e fatores, planejamento do experimento, condução do experimento, análise dos dados, conclusão e recomendações. (CARPINETTI, 2009)

Segundo Carpinetti (2009), o uso dessa técnica permite uma melhora na qualidade de um produto ou processo através do levantamento das seguintes informações:

- Quais variáveis de entrada influenciam de forma significativa na resposta da variável de saída do processo;
- Os valores dos parâmetros de entrada devem ser os mais influentes possíveis, de modo que a variabilidade dos parâmetros de saída seja mínima;
- Atribuir valores as variáveis não controláveis que influenciam na resposta da variável de saída, de modo que o efeito dessas variáveis seja minimizado.

Dentre os planejamentos de experimentos mais utilizados estão: superfície de resposta, fatorial completo, método de Taguchi e composto central duplo (Central Composite Desing). Além disso, essa técnica é uma junção de ferramentas matemáticas e estatísticas como o modelo de regressão e a análise de variância. (PRASAD et al., 2012)



#### 4.4.2 Análise de variância – ANOVA

A análise de variância ou ANOVA (do inglês Analysis of Variance) é utilizado para comparar médias de três ou mais populações através da análise de variâncias amostrais. O teste consiste em extrair a média de cada população e determinar se as diferenças entre as médias amostrais e as médias populacionais são significativas. (FÁVERO e BELFIORE, 2017)

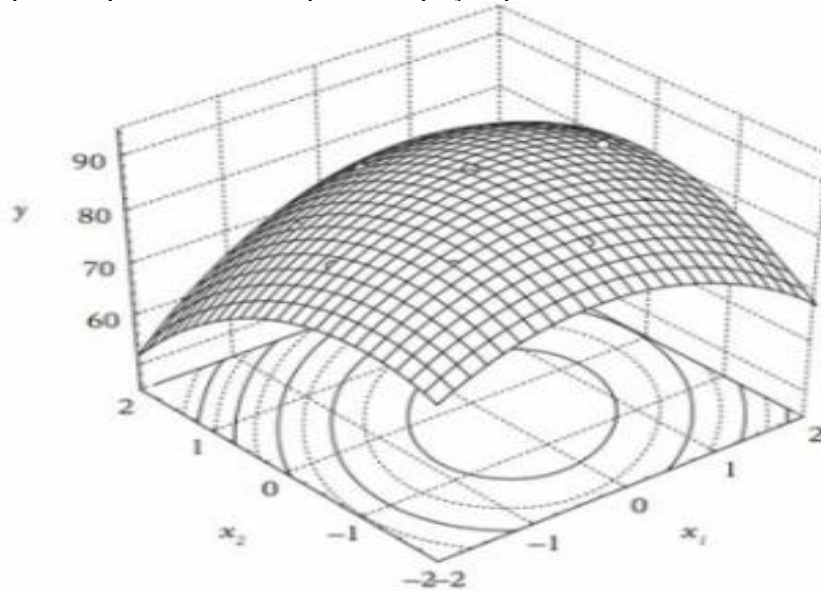
Segundo Barbetta, Reis e Bornia (2004), as suposições da ANOVA são:

- As amostras devem ser independentes;
- As variâncias populacionais devem ser iguais;
- A distribuição das observações dos grupos deve ser normal;

#### 4.4.3 Superfícies de resposta

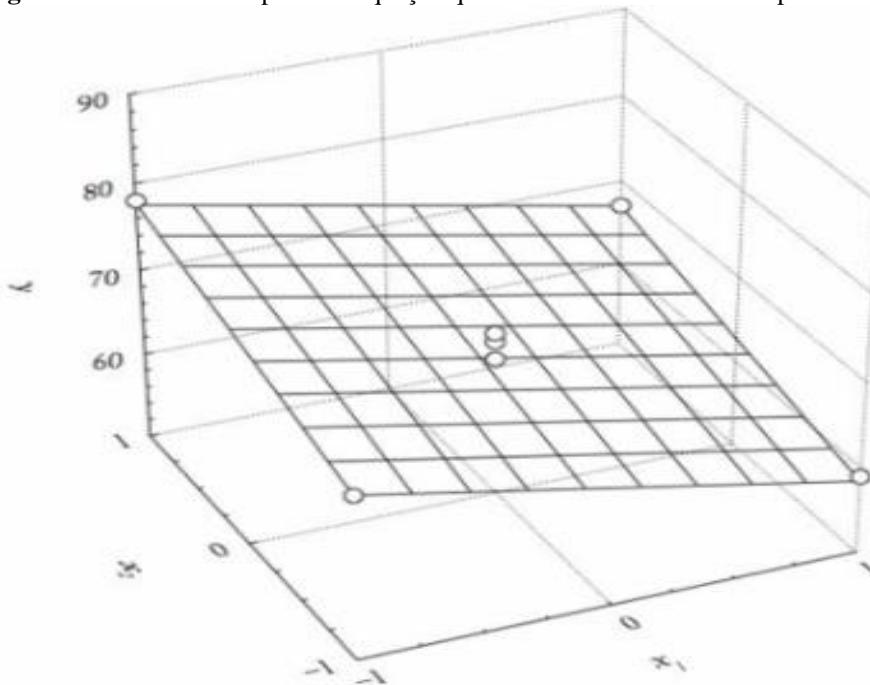
A superfície de resposta (ou RSM, de Response Surface Methodology) é uma ferramenta de otimização baseada em planejamentos fatoriais. Essa técnica foi criada por G.E.P. Box na década de 1950 e tem sido usada amplamente utilizada para modelar processos nas indústrias. Esse método possui duas fases distintas: modelagem e deslocamento, que são repetidas inúmeras vezes até atingir o objetivo que no caso é determinar uma região de interesse dentro da superfície investigada. A modelagem é feita utilizando modelos lineares ou quadráticos. O modelo quadrático para duas variáveis possui seis parâmetros e consiste na combinação entre as variáveis independentes de forma a obter uma relação máxima entre essas variáveis que é representada na superfície pelo ponto de máximo, também denominado de ponto crítico, tal modelo pode ser visualizado na figura 5. Enquanto, no modelo linear, que pode ser visto na figura 6, o valor máximo que relaciona as variáveis independentes está associado a inclinação das curvas de níveis da superfície modelada e, por sua vez esse valor cresce ao longo de uma trajetória perpendicular a curva de nível, esse modelo pode ser visto na figura 6. (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010)

**Figura 5** - Superfície quadrática descrita por uma equação que relaciona as variáveis independentes.



**Fonte:** (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010)

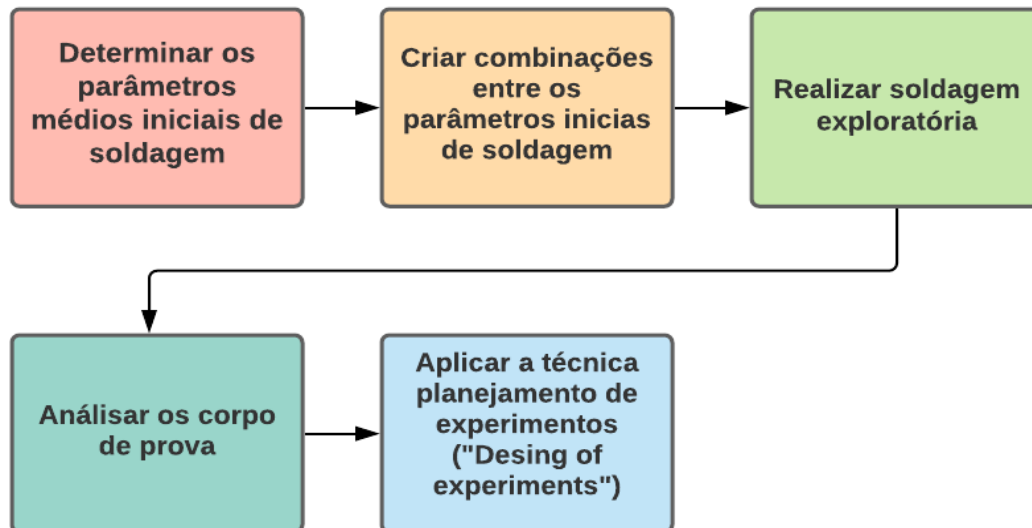
**Figura 6** - Plano descrito por uma equação que relaciona as variáveis independentes.



**Fonte:** (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010)

## 5. MÉTODOS

Figura 7 - Fluxograma esquemático das etapas do método utilizado.



Fonte: Elaborado pelos autores.

### Etapa 01 – Revisão bibliográfica

Tomando como base o estudo de processos de soldagem, foi utilizado o seguinte livro: Soldagem: Fundamentos e Tecnologia – Paulo Villani, que aborda os fundamentos, equipamentos, consumíveis e técnicas operatórias do processo de soldagem a arco submerso. Para a análise estatística, foi utilizado o livro: Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com Excel®, SPSS® e STATISTICA® - Luiz Fávero e Paulo Belfiore, que aborda os conceitos e tipos de análise de variância (ANOVA). E por fim, foi utilizado o livro: Como Fazer Experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria - Benício Barros Neto et al., que retrata um estudo a respeito de superfície de resposta.

Também serão pesquisados em artigos científicos publicados em revistas qualificadas na área do assunto em questão de forma a investigar a comprovação ou explanação de teorias sobre o assunto

## **Etapa 02 – Definição de parâmetros médios iniciais de soldagem**

Na determinação dos parâmetros adequados de soldagem, foi necessário partir de valores iniciais para as grandezas tensão, corrente e velocidade do processo. De modo que, foi utilizado os valores médios como referência inicial para realizar os testes. Esses valores foram adotados com base na seguinte literatura: Welding Handbook, Volume 2 – Arthur Phillips e Charlotte Weisman.

## **Etapa 03 – Criação de combinações entre os parâmetros de soldagem**

Antes de realizar o processo de soldagem foi utilizado os valores médios de cada grandeza para gerar uma lista, através do software STATISTICA, de possíveis combinações entre esses parâmetros, de tal maneira que a tensão, a corrente e a velocidade do processo de soldagem são as variáveis independentes e a partir dessas combinações foi realizado a soldagem exploratória.

## **Etapa 04 – Soldagem exploratória**

O processo de soldagem exploratória consiste na realização de solda em corpos de prova para verificar a influência das variáveis independentes na geometria da junta soldada. De início, os testes foram realizados para todas as combinações geradas na lista de parâmetros independentes, lista essa que relaciona tensão, corrente e velocidade do processo de soldagem.

Ao fim de cada teste, surgiram as variáveis dependentes que estão relacionados com as características geométricas da junta soldada, são essas: penetração, reforço e largura do cordão de solda. Os valores dessas variáveis foram coletados para uma análise futura.

## **Etapa 05 – Análise de corpo de prova**

Ao fim da execução de cada teste na soldagem exploratória, as medidas de cada corpo de prova: penetração, reforço e largura do cordão de solda, foram coletadas para posteriormente serem analisadas com o intuito de determinar uma relação entre as

variáveis dependentes e independentes. De modo a coletar as medidas desses parâmetros de geometria da junta, foi realizado ensaios macrográficos em cada corpo de prova.

Desta forma, o ensaio contou com as seguintes atividades:

- I – Cortes nas juntas soldadas para analisar a secção transversal;
- II – Lixamento das peças com as lixas de numerações 100, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200;
- III – Polimento com pano e pasta diamantada de 1  $\mu\text{m}$  e 3  $\mu\text{m}$ ;
- IV – Atacar com reagente ácido nítrico (nital) de concentração de 2% e submeter a peça durante um tempo de ataque de 15 segundos;
- V – Realizar análise das macroestruturas por meio de imagens da superfície ensaiada com auxílio do software Image-Pro Plus

### **Etapa 06 – Utilização da ferramenta DOE**

A técnica utilizada para realizar as análises estatísticas foi a de planejamento de experimentos (“Desing of Experiments”) que consiste na composição das seguintes ferramentas: análise de variância (ANOVA) e superfície de resposta, ambas as técnicas foram realizadas com o auxílio do software STATISTICA. De acordo com os dados coletados da soldagem exploratória, foi gerado um quadro onde para cada teste experimental com as variáveis independentes tensão, corrente e velocidade de soldagem, foi associado os respectivos valores de penetração, reforço e largura do cordão. Com base nesse quadro, foi utilizado a análise de variância para verificar quais das três variáveis independentes causam uma maior influência nas seguintes variáveis resultantes do processo. Após o uso da técnica ANOVA, foi utilizado a ferramenta superfície de resposta onde foram obtidas as equações de modelo quadrático que deram origem as curvas de níveis e os gráficos de superfície quadrática e, por fim, a partir dos valores críticos obtidos pelas equações, foram determinadas as regiões que maximizavam as variáveis resultantes para cada combinação das variáveis independentes.

## 6. RESULTADOS

### 6.1 Definição de parâmetros médios iniciais de soldagem

Para determinar os parâmetros iniciais de operação, foram utilizados os valores médios obtidos da seguinte literatura: Welding Handbook - 9 Edition, Volume 2. Esses valores podem ser visualizados no quadro 1.

**Quadro 1:** Valores médios utilizados para gerar a lista de combinações.

Valores	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
Mínimo	475	27	35
Centro	500	31	40
Máximo	525	35	45

**Fonte:** Elaborado pelos autores.

### 6.2 Criação de combinações entre os parâmetros de soldagem

Com base nos valores médios de tensão, corrente e velocidade de soldagem que foram obtidos do quadro 1, foi gerado através da técnica “Cubic Plus Star” do software STATISTICA o quadro 2 que apresenta uma faixa de valores para cada parâmetro de operação da máquina e, em seguida, foram criadas dezesseis combinações entre as variáveis independentes.

**Quadro 2:** Quadro de combinações entre os parâmetros independentes do processo de soldagem.

Combinação	Corrente(A)	Tensão(V)	Velocidade de soldagem
1	475,00000	27,000000	35,000000
2	475,00000	27,000000	45,000000
3	475,00000	35,000000	35,000000
4	475,00000	35,000000	45,000000
5	525,00000	27,000000	35,000000
6	525,00000	27,000000	45,000000
7	525,00000	35,000000	35,000000
8	525,00000	35,000000	45,000000
9	457,95520	31,000000	40,000000
10	542,04480	31,000000	40,000000
11	500,00000	24,272830	40,000000
12	500,00000	37,727170	40,000000
13	500,00000	31,000000	31,591040
14	500,00000	31,000000	48,408960
15	500,00000	31,000000	40,000000
16	500,00000	31,000000	40,000000

Fonte: Elaborado pelos autores

### 6.3 Soldagem exploratória

Durante a soldagem experimental, foram utilizados dezesseis corpos de prova para serem ensaiados, onde ao longo dos testes foram usados os parâmetros independentes obtidos no quadro 2 e, ao fim de cada processo de soldagem foram realizados ensaios macrográficos nas amostras e, em seguida obtidos os valores dos seguintes parâmetros dependentes: penetração, reforço e largura do cordão de solda. Esses valores podem ser visualizados no quadro 3, onde para cada teste com os parâmetros independentes foi associado os respectivos valores dos parâmetros dependentes. Sabe-se que, para obter maiores valores de penetração são necessários altos valores de corrente, porém de acordo com o quadro 3 para um valor máximo de corrente de 542,0448 amperes, a penetração foi de 5,74 milímetros, o que de acordo com os valores tabulados não foi o maior valor de penetração. Dessa forma, podemos afirmar que a relação entre a corrente e a penetração não é totalmente linear por causa das variáveis de tensão e velocidade de soldagem que influenciam em maior ou menor grau na penetração, assim como para

maiores valores de largura é requerido alto valores de tensão e para maiores valores de reforço é requerido baixos valores de velocidade de soldagem. Ademais, podemos afirmar que essas relações não são predominantemente lineares, pois as demais variáveis exercem um grau de influência na variável dependente.

**Quadro 3:** Relação entre os parâmetros independentes e dependentes obtidos após a soldagem exploratória.

Combinação	Corrente(A)	Tensão(V)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Penetração(mm)	Reforço(mm)	Largura(mm)
1	475,00000	27,00000	35,00000	4,75000	3,97000	18,68000
2	475,00000	27,00000	45,00000	5,72000	3,78000	15,64000
3	475,00000	35,00000	35,00000	5,30000	2,47000	22,35000
4	475,00000	35,00000	45,00000	4,76000	2,79000	17,74000
5	525,00000	27,00000	35,00000	4,02000	4,14000	20,44000
6	525,00000	27,00000	45,00000	5,91000	3,68000	15,00000
7	525,00000	35,00000	35,00000	5,47000	2,69000	24,48000
8	525,00000	35,00000	45,00000	5,28000	2,49000	21,70000
9	457,95520	31,00000	40,00000	4,63000	1,46000	23,63000
10	542,04480	31,00000	40,00000	5,74000	2,12000	19,38000
11	500,00000	24,27283	40,00000	5,12000	4,82000	11,96000
12	500,00000	37,72717	40,00000	6,22000	2,59000	21,59000
13	500,00000	31,00000	31,59104	5,50000	3,87000	23,76000
14	500,00000	31,00000	48,40896	6,28000	2,86000	15,25000
15	500,00000	31,00000	40,00000	6,32000	3,04000	18,87000
16	500,00000	31,00000	40,00000	6,16000	3,04000	16,23000

**Fonte:** Elaborado pelos autores.

#### 6.4 Análise de corpo de prova

Para obter os valores dos seguintes parâmetros dependentes: penetração, reforço e largura do cordão de solda, foram realizados ensaios macrográficos que consistem em: realizar corte na secção transversal da junta soldada, lixar, polir com pasta diamantada, realizar ataque químico e gerar a imagem para análise das medições. Esses procedimentos foram realizados em dezesseis corpos de prova e as imagens foram geradas com auxílio do software Image-Pro Plus que realizou as medições e a captura das imagens das juntas soldadas. De tal maneira que, foi possível avaliar com nitidez e realizar a coleta dos valores de penetração, reforço e a largura do cordão de solda, conforme é mostrado nas figuras 8 e 9.

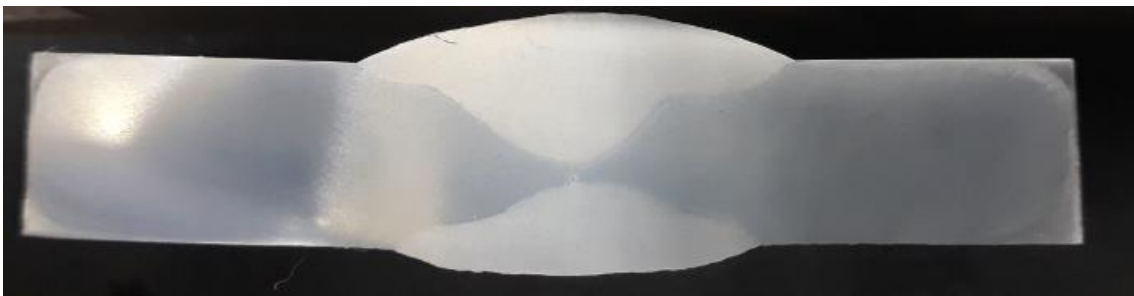


**Figura 8:** Ensaio macrográfico realizado em um dos corpos de prova.



**Fonte:** Elaborado pelos autores.

**Figura 9:** Ensaio macrográfico realizado em outro corpo de prova.



**Fonte:** Elaborado pelos autores.

## 6.5 Utilização da ferramenta DOE

Com base nos valores obtidos do quadro 3, foi realizado uma análise de variância (ANOVA) por meio do software STATISTICA para identificar uma possível variável independente com um maior grau de influência na variável dependente, de forma a obter uma relação entre os parâmetros independentes tensão, corrente e velocidade de soldagem, que maximize os valores das variáveis dependentes. De tal maneira que, primeiramente foi analisado o grau de influência que cada variável independente gera na variável penetração.

De acordo com o quadro 4, os valores que estão destacados em vermelhos estão enfatizados com base no valor-p que significa probabilidade de significância e, para valores-p menores do que o estabelecido de 0,05 (5%), tem-se uma forte relação com a variável dependente. De modo que, a parcela quadrática da corrente apresentou um valor-

p de 0,016925 que significa que existe um alto grau de influência na penetração. Além disso, o outro item destacado em vermelho (2L by 3L) indica que a tensão e a velocidade de soldagem em conjunto, geram influência significativa na penetração.

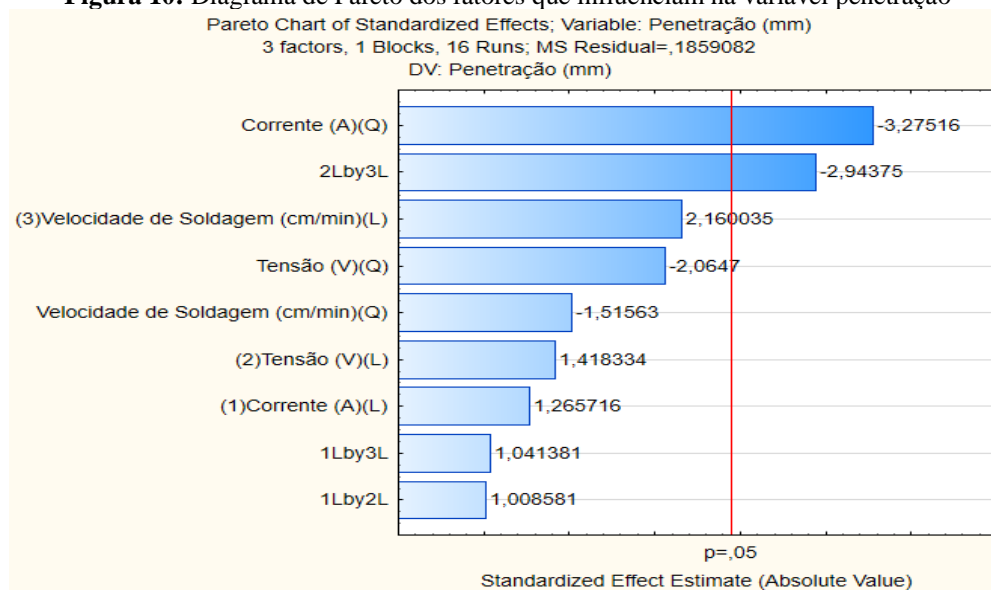
**Quadro 4:** Tabela ANOVA para análise da variável penetração.

Factor	DV: Penetração (mm)				
	SS	df	MS	F	p
(1)Corrente (A)(L)	0,297832	1	0,297832	1,60204	0,252541
Corrente (A)(Q)	1,994179	1	1,994179	10,72669	0,016925
(2)Tensão (V)(L)	0,373986	1	0,373986	2,01167	0,205882
Tensão (V)(Q)	0,792527	1	0,792527	4,26300	0,084505
(3)Velocidade de Soldagem (cm/min)(L)	0,867402	1	0,867402	4,66575	0,074073
Velocidade de Soldagem (cm/min)(Q)	0,427056	1	0,427056	2,29713	0,180395
1L by 2L	0,189112	1	0,189112	1,01724	0,352104
1L by 3L	0,201613	1	0,201613	1,08447	0,337831
2L by 3L	1,611013	1	1,611013	8,66564	0,025822
Error	1,115449	6	0,185908		
<b>Total SS</b>	<b>6,757975</b>	<b>15</b>			

Fonte: Elaborado pelos autores.

Como o valor-p foi inferior a 0,05, foi rejeitado a hipótese nula de que não há diferença entre as médias e concluído que existe uma diferença significativa. De tal maneira que, com base na figura 10, a parcela quadrática da corrente e o conjunto tensão e velocidade de soldagem (2L by 3L) exercem maior influência e são inversamente proporcionais a penetração por causa do sinal negativo.

**Figura 10:** Diagrama de Pareto dos fatores que influenciam na variável penetração



Fonte: Elaborado pelos autores.

Após a análise de variância foi utilizado a técnica superfície de resposta para gerar as curvas de níveis e as superfícies quadráticas com o intuito de localizar o ponto máximo para as variáveis dependentes e encontrar uma faixa de valores que maximize essa variável. Essa técnica consiste em um modelo quadrático dado pela equação que se encontra na figura 11.

**Figura 11:** Modelo quadrático, expressão geral para duas variáveis.

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2 .$$

**Fonte:** (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010)

Onde  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_{11}$ ,  $b_{22}$ ,  $b_{12}$  são os estimadores dos parâmetros do modelo e  $x_1$ ,  $x_2$  são os fatores codificados. Os valores de  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_{11}$ ,  $b_{22}$ ,  $b_{12}$  podem ser obtidos pelo método dos mínimos quadrados. As duas equações foram obtidas com base no modelo quadrático, a primeira atribuindo  $x_1$  e  $x_2$  as grandezas tensão e corrente e, para a segunda equação foi destinado as grandezas corrente e velocidade de soldagem para atribuir as variáveis  $x_1$  e  $x_2$ . Após a obtenção das equações do modelo, foram localizados dois valores máximos para a variável dependente, um para a combinação das grandezas tensão e corrente e outro para velocidade de soldagem e corrente. Esses valores máximos, também denominados de pontos críticos, representam o maior valor de penetração dentro uma faixa de valores e, juntamente com esses pontos críticos foram localizados os pontos mínimos e os pontos máximos. Essas informações estão ilustradas no quadro 5, onde os valores de 457,9552 A e 24,2728 V, respectivos a corrente e tensão, são os valores mínimos que foram utilizados durante os ensaios, daí a denominação ponto mínimo, assim como os valores iguais a 542,0448 A e 37,7272 V são os valores máximos de corrente e tensão utilizados e, por fim, as quantidades 507,2325 A e 27,5035 V representam o ponto crítico e resultam no valor máximo de penetração dentro da região que maximiza a penetração. Essa análise pode ser feita para as outras combinações de variáveis que se encontram no quadro 5. Todavia, para obter a equação do modelo quadrático e os demais pontos que caracterizam a região de ápice, foi utilizado o software STATISTICA.

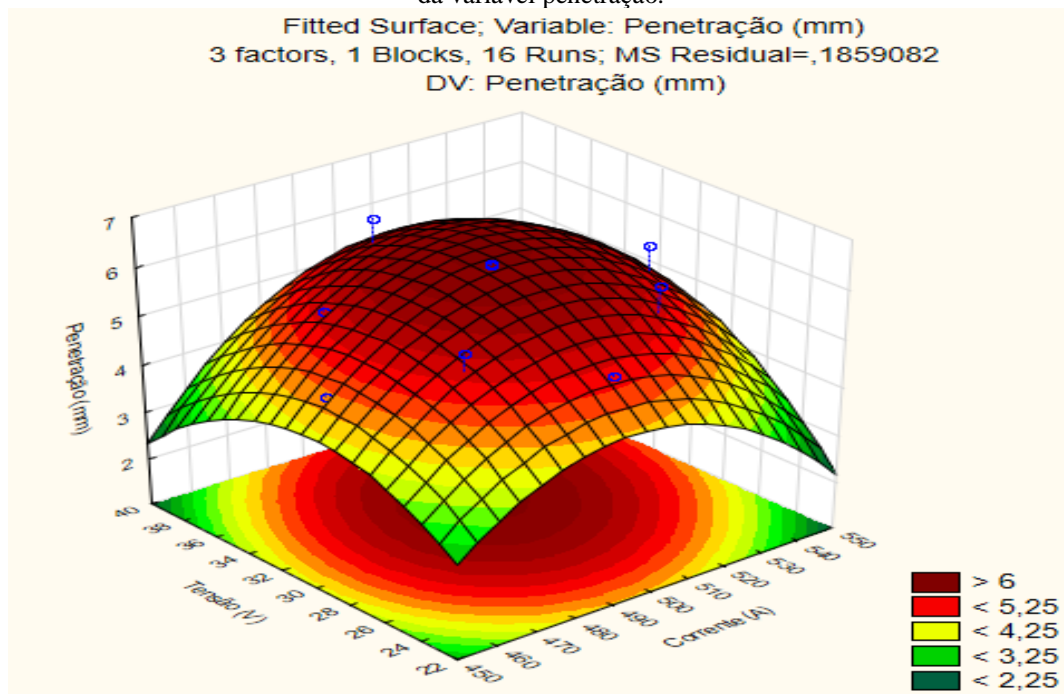
**Quadro 5:** Combinação de valores entre as variáveis corrente, tensão e velocidade de soldagem para análise da variável penetração.

Factor	Observed Minimum	Critical Values	Observed Maximum
Corrente (A)	457,9552	507,2325	542,0448
Tensão (V)	24,2728	27,5035	37,7272
<b>Velocidade de Soldagem (cm/min)</b>	31,5910	48,0367	<b>48,4090</b>

Fonte: Elaborado pelos autores.

A equação do modelo quadrático gerou a superfície de controle que está ilustrada na figura 12. A partir dos valores críticos das combinações das grandezas tensão e corrente, foi possível determinar a região de interesse que maximiza o valor de penetração. De modo que, conforme o quadro 5, o ponto crítico foi de 507,2325 A e 27,5035 V, respectivos a corrente e tensão. Esses valores, por sua vez representam os valores máximos dentro da região que maximiza a penetração. Logo, para quaisquer valores próximos aos críticos irá resultar em maiores valores de penetração.

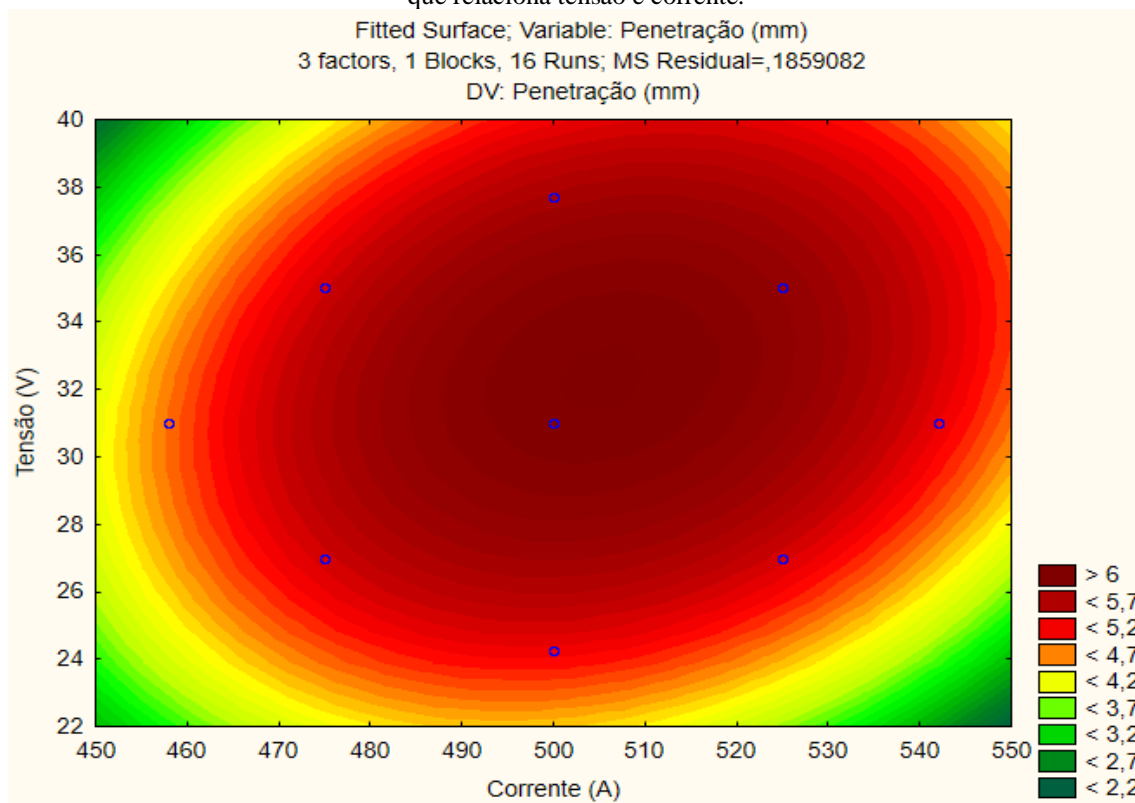
**Figura 12:** Superfície quadrática formada pela combinação das grandezas tensão e corrente para análise da variável penetração.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Com base na figura 13, é possível visualizar a região que contém os maiores valores de penetração. Essa área pode ser identificada pela tonalidade vermelho escuro localizada próximo ao centro da curva de nível. Essa região contém valores de penetração maiores do que 6 mm, enquanto os menores valores encontrados nas curvas de níveis foram da ordem de 2,2 mm.

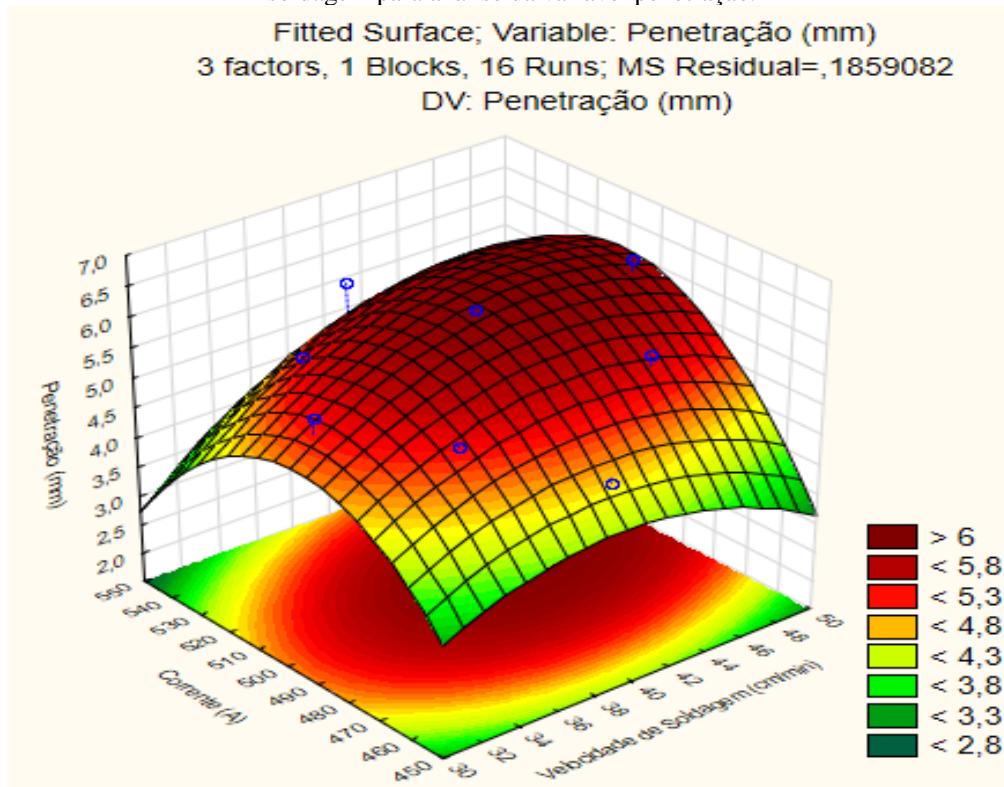
**Figura 13:** Análise da variável penetração a partir de curvas de níveis obtidas da superfície quadrática que relaciona tensão e corrente.



**Fonte:** Elaborado pelos autores.

De acordo com a figura 14, é possível visualizar a superfície gerada pela combinação das variáveis corrente e velocidade de soldagem, onde a variável dependente continua sendo a penetração. A região que maximiza a penetração está em torno dos seguintes valores de ponto crítico: 507,2325 A e 48,0367 cm/min, respectivos a corrente e velocidade de soldagem. Portanto, valores próximos aos críticos resultará em maiores valores de penetração.

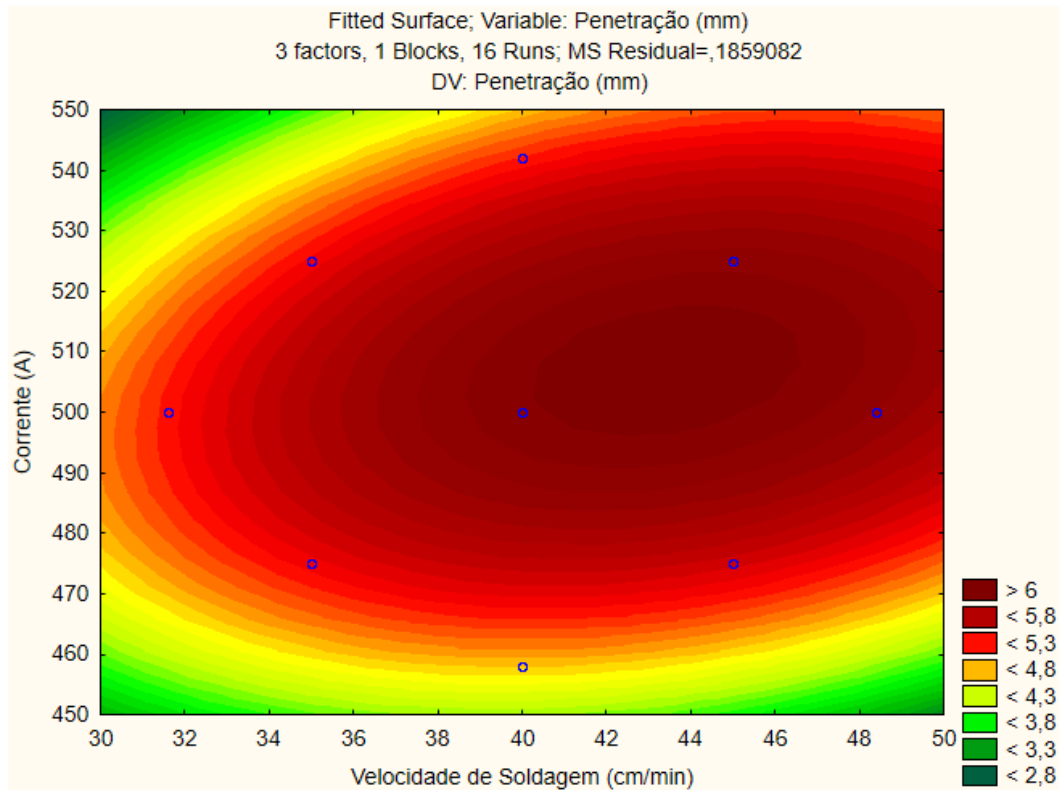
**Figura 14:** Superfície quadrática formada pela combinação das grandezas corrente e velocidade de soldagem para análise da variável penetração.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Através da curva de nível ilustrada na figura 15, é possível visualizar a região de penetração máxima através da tonalidade vermelho escuro, onde os valores de penetração são superiores a 6 mm e os menores valores encontrados na curva de nível foram inferiores a 2,8 mm e estão localizados nas áreas delimitadas pela tonalidade verde escuro.

**Figura 15:** Análise da variável penetração a partir de curvas de níveis obtidas da superfície quadrática que relaciona corrente e velocidade de soldagem.



**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Para determinar a influência das variáveis independentes corrente, tensão e velocidade de soldagem na variável dependente reforço, foi realizado o mesmo procedimento descrito anteriormente para a variável penetração.

Como mencionado anteriormente, para valores de significância menores do que 0,05 (5%), tem-se que a variável independente possui uma forte relação com a variável dependente. Logo, com base no quadro 6 o menor valor-p foi da parcela linear da grandeza tensão, cujo valor foi de 0,000286, seguido da parcela quadrática da corrente que teve um valor-p de 0,012258 e, por último, a parcela quadrática da tensão que teve um valor de 0,026890. De tal maneira que, a variável reforço é influenciada com mais intensidade pela tensão seguido da corrente.



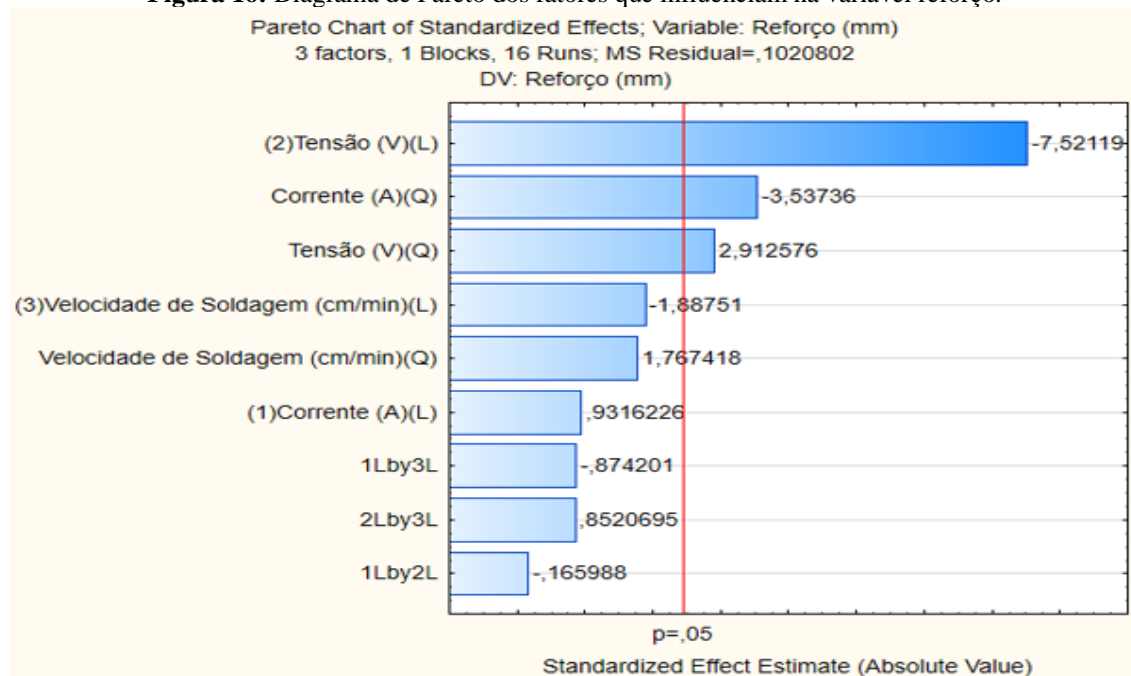
**Quadro 6:** Tabela ANOVA para a variável dependente reforço.

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Corrente (A)(L)	0,08860	1	0,088598	0,86792	0,387483
Corrente (A)(Q)	1,27732	1	1,277322	12,51293	0,012258
(2)Tensão (V)(L)	5,77450	1	5,774497	56,56825	0,000286
Tensão (V)(Q)	0,86596	1	0,865957	8,48310	0,026890
(3)Velocidade de Soldagem (cm/min)(L)	0,36368	1	0,363679	3,56268	0,108025
Velocidade de Soldagem (cm/min)(Q)	0,31887	1	0,318875	3,12377	0,127579
1L by 2L	0,00281	1	0,002812	0,02755	0,873619
1L by 3L	0,07801	1	0,078012	0,76423	0,415624
2L by 3L	0,07411	1	0,074112	0,72602	0,426871
Error	0,61248	6	0,102080		
<b>Total SS</b>	<b>11,19394</b>	<b>15</b>			

Fonte: Elaborado pelos autores.

De acordo com o diagrama de Pareto da figura 16, é possível verificar que a parcela linear da tensão é inversamente proporcional a grandeza reforço, enquanto a parcela quadrática da tensão é diretamente proporcional a mesma. Além da tensão, tem-se uma parcela quadrática da corrente que atua de forma inversamente proporcional a variável reforço.

**Figura 16:** Diagrama de Pareto dos fatores que influenciam na variável reforço.



Fonte: Elaborado pelos autores.



Com base na equação para modelo quadrático, foram criadas duas equações, uma com as variáveis dependentes  $X_1$  e  $X_2$  relacionando a tensão e a corrente e, a outra equação contendo como variáveis dependentes  $X_1$  e  $X_2$  a corrente e a velocidade de soldagem. De modo que, foram obtidos os pontos críticos que maximizam os valores da variável reforço. Esses valores podem ser visualizados no quadro 7 abaixo.

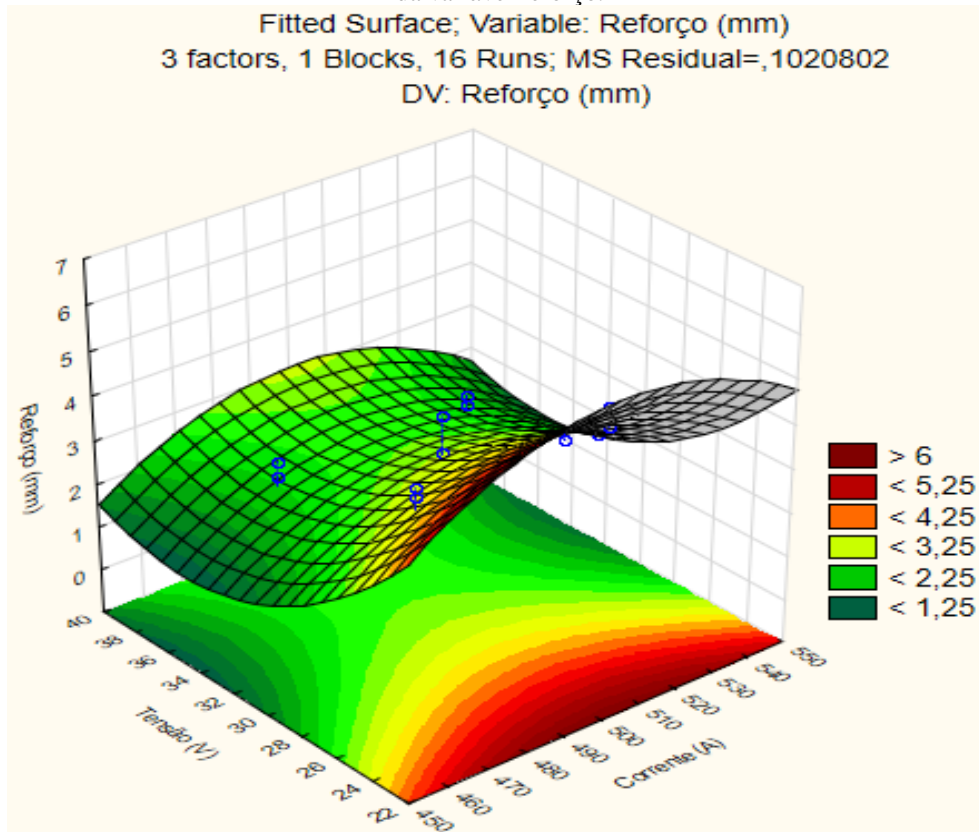
**Quadro 7:** Combinação de valores entre as variáveis corrente, tensão e velocidade de soldagem para análise da variável reforço.

Factor	Observed Minimum	Critical Values	Observed Maximum
Corrente (A)	457,9552	501,4379	542,0448
Tensão (V)	24,2728	35,1434	37,7272
<b>Velocidade de Soldagem (cm/min)</b>	31,5910	40,9320	<b>48,4090</b>

**Fonte:** Elaborado pelos autores.

A superfície quadrática gerada pela equação que relaciona a tensão e a corrente pode ser visualizada na figura 17. Com base no quadro 7, os valores de tensão e corrente que maximizam a variável reforço são 35,1434 V e 501,4379 A respectivos a tensão e corrente. Logo, quaisquer valores próximos a esses são esperados valores altos de penetração.

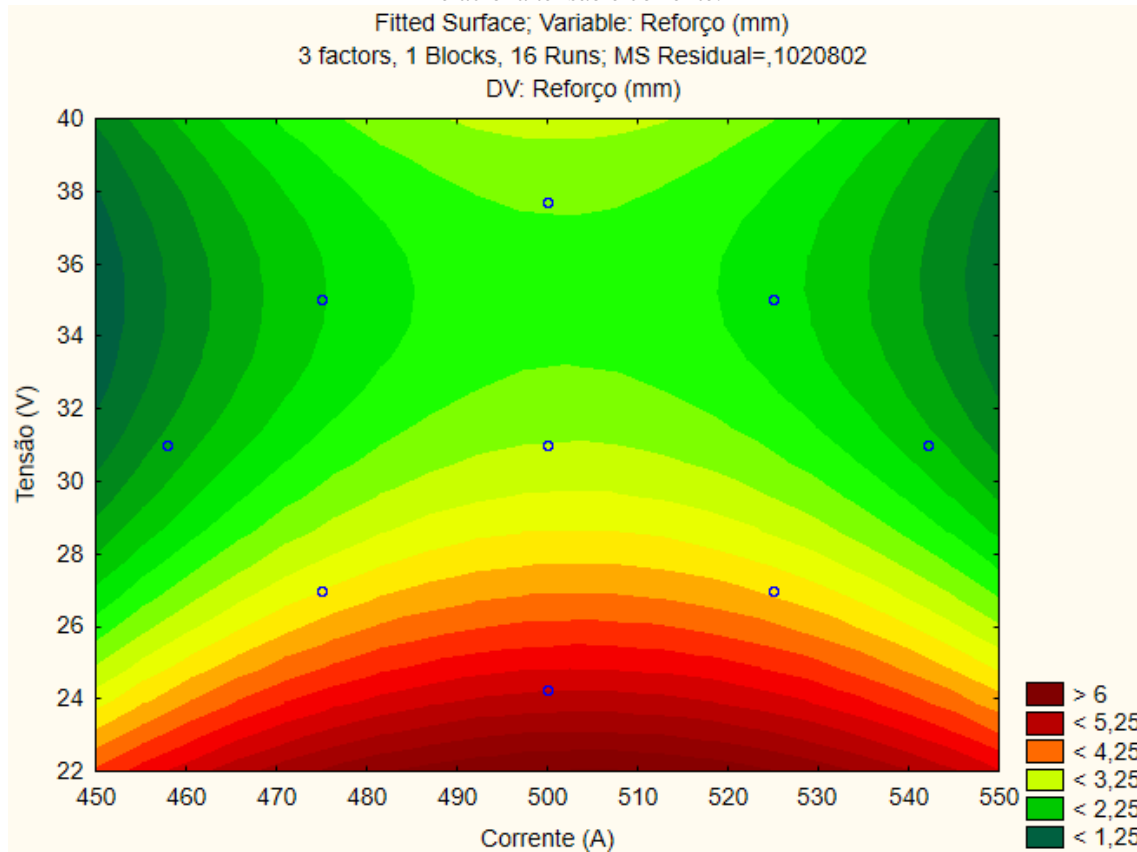
**Figura 17:** Superfície quadrática formada pela combinação das grandezas tensão e corrente para análise da variável reforço.



**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Região que maximiza os valores de reforço pode ser visualizada na figura 18. Onde para cada tonalidade do gráfico, representa um conjunto de dados entre tensão e corrente que estão na mesma altitude, ou seja, possuem os mesmos valores de reforço. De modo que, os maiores valores para reforço se encontram dentro da região de tonalidade vermelho escuro e os valores são superiores a 6 mm. Entretanto, os menos valores encontrados para a variável reforço estão delimitados pela área com a tonalidade verde escuro e as quantidades são inferiores a 1,25 mm.

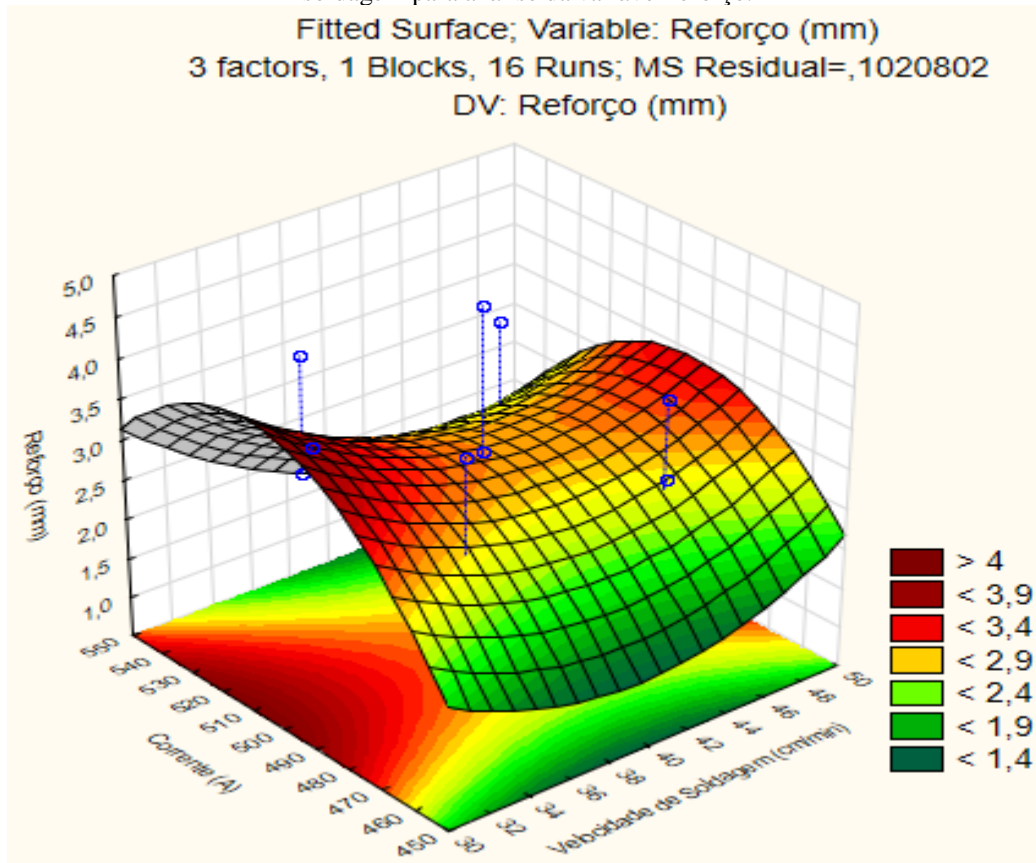
**Figura 18:** Análise da variável reforço a partir de curvas de níveis obtidas da superfície quadrática que relaciona tensão e corrente.



**Fonte:** Elaborado pelos autores.

A superfície de controle gerada pela equação quadrática que relaciona as grandezas corrente e velocidade de soldagem pode ser visualizada na figura 19. Onde por meio dos valores do quadro 7, é possível determinar maiores valores de reforço com base nos valores do ponto crítico, que no caso são: 501,4379 A e 40,9320 cm/min, respectivos a corrente e velocidade de soldagem.

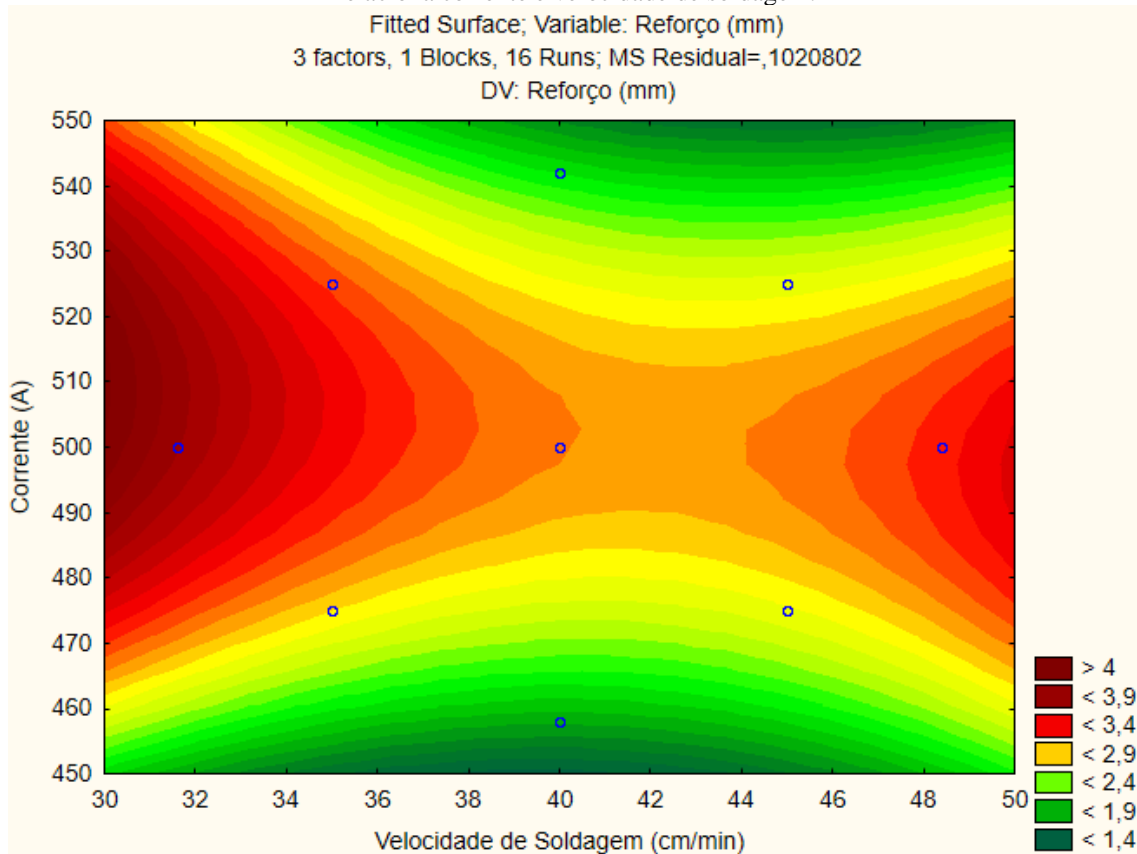
**Figura 19:** Superfície quadrática formada pela combinação das grandezas corrente e velocidade de soldagem para análise da variável reforço.



**Fonte:** Elaborado pelos autores.

De acordo com a figura 20, por meio das curvas de níveis é possível verificar que a região de maior reforço foi obtida através de menores velocidades durante o processo de soldagem e isso pode ser justificado pelo fato de que mais material é depositado em uma região durante um intervalo de tempo maior e, esse efeito é gerado devido à baixa velocidade. O fato dos valores de reforço não se comportarem totalmente de maneira inversamente proporcional a velocidade de soldagem pode ser justificado pela influência das outras variáveis do processo. Assim, os maiores valores de reforço estão localizados na área delimitada pela tonalidade vermelho escuro e os valores são superiores a 4 mm, enquanto os menores resultados estão localizados nas regiões delimitadas pela tonalidade verde escuro e as quantidades inferiores a 1,4 mm.

**Figura 20:** Análise da variável reforço a partir de curvas de níveis obtidas da superfície de controle que relaciona corrente e velocidade de soldagem.



**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Por fim, tomando como base o quadro 8, é possível verificar através da análise de variância que a tensão e a velocidade de soldagem impactam de forma considerável nos valores de largura do cordão de solda, uma vez que essas duas grandezas possuem valores-p menores do que 0,05. De tal maneira que, entre a tensão e velocidade de soldagem, a tensão possui uma maior influência pelo fato do valor-p ser menor.

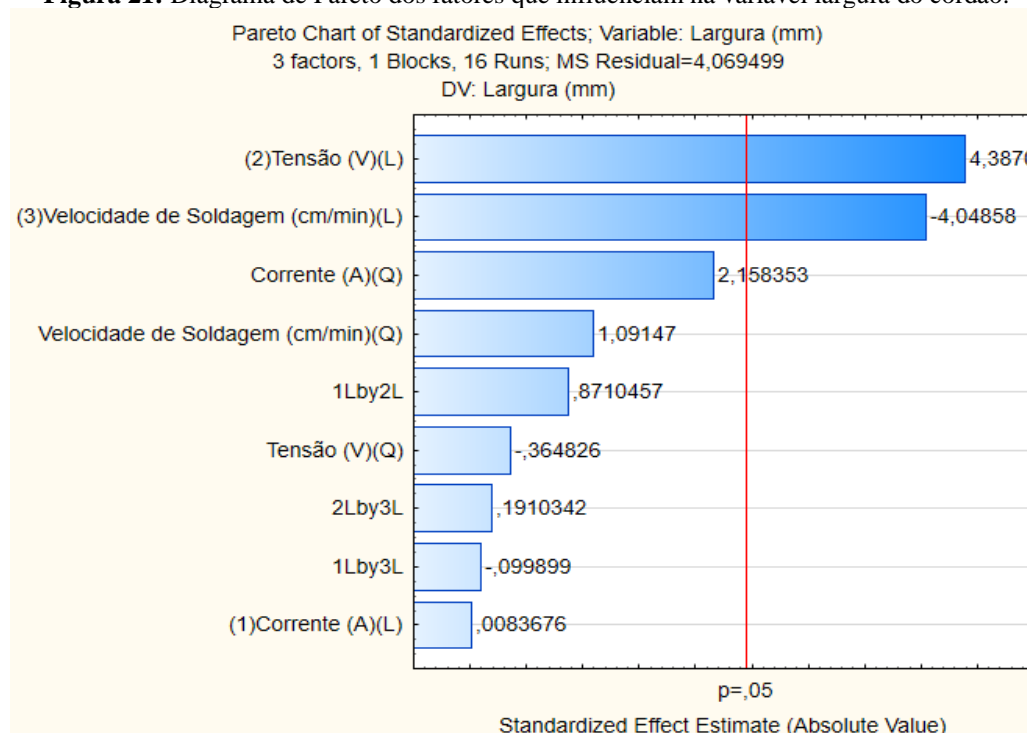
**Quadro 8:** Tabela ANOVA para análise da variável largura.

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Corrente (A)(L)	0,0003	1	0,00028	0,00007	0,993595
Corrente (A)(Q)	18,9577	1	18,95772	4,65849	0,074245
(2)Tensão (V)(L)	78,3241	1	78,32408	19,24661	0,004633
Tensão (V)(Q)	0,5416	1	0,54164	0,13310	0,727755
(3)Velocidade de Soldagem (cm/min)(L)	66,7033	1	66,70325	16,39102	0,006737
Velocidade de Soldagem (cm/min)(Q)	4,8480	1	4,84802	1,19131	0,316945
1L by 2L	3,0876	1	3,08761	0,75872	0,417214
1L by 3L	0,0406	1	0,04061	0,00998	0,923679
2L by 3L	0,1485	1	0,14851	0,03649	0,854799
Error	24,4170	6	4,06950		
<b>Total SS</b>	<b>201,4014</b>	<b>15</b>			

**Fonte:** Elaborado pelos autores.

De acordo com a figura 21, a parcela linear da tensão é diretamente proporcional e exerce maior influência na variável largura, assim como a grandeza velocidade de soldagem que exerce menos influência e a parcela linear é inversamente proporcional a variável de análise.

**Figura 21:** Diagrama de Pareto dos fatores que influenciam na variável largura do cordão.



**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Após a análise utilizando a técnica ANOVA, foram obtidas duas equações quadráticas, onde as variáveis se alternavam entre as seguintes combinações de grandezas:

- Corrente e tensão;
- Corrente e velocidade de soldagem;

De tal maneira que, através dessas equações foram determinados os valores críticos que caracterizam a região que maximiza a largura do cordão de solda, conforme está evidente no quadro 9.

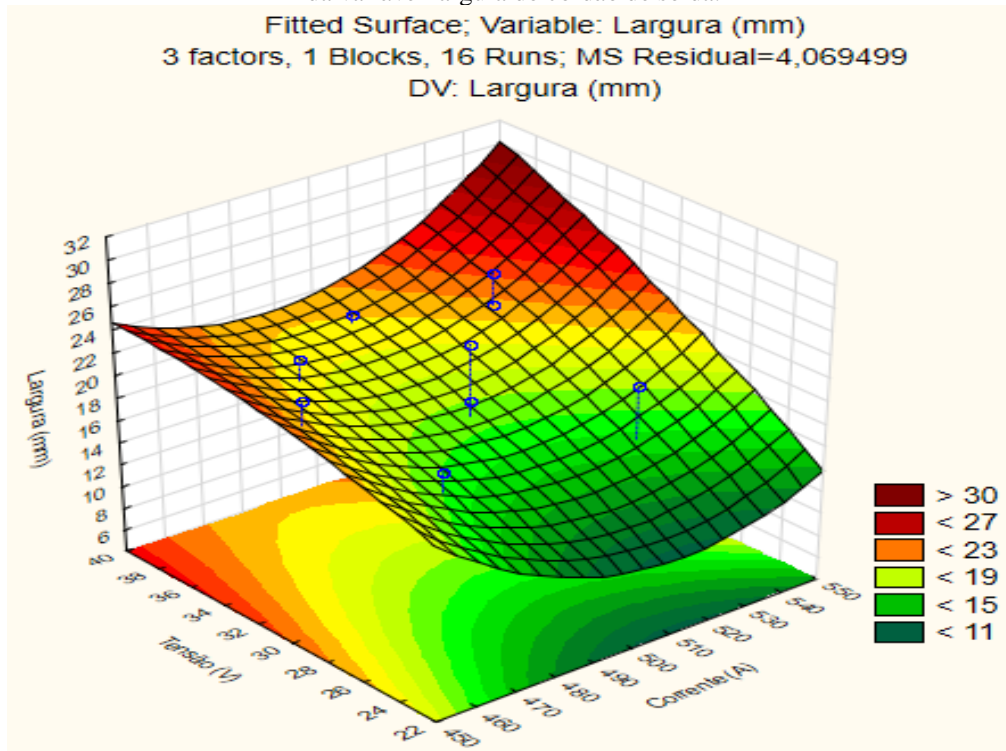
**Quadro 9:** Combinação de valores entre as variáveis corrente, tensão e velocidade de soldagem para análise da variável largura de solda.

Factor	Observed Minimum	Critical Values	Observed Maximum
Corrente (A)	457,9552	478,1731	542,0448
Tensão (V)	24,2728	47,5557	37,7272
Velocidade de Soldagem (cm/min)	31,5910	45,4738	48,4090

**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Com base na equação que relaciona a tensão e a corrente foi possível determinar a superfície de controle da figura 22, onde a região que maximiza a largura do cordão de solda está determinada pelos valores próximos aos do ponto crítico, que conforme o quadro 9, são os seguintes valores de 47,5557 V e 478,1731 A, respectivos a tensão e corrente.

**Figura 22:** Superfície quadrática formada pela combinação das grandezas tensão e corrente para análise da variável largura do cordão de solda.

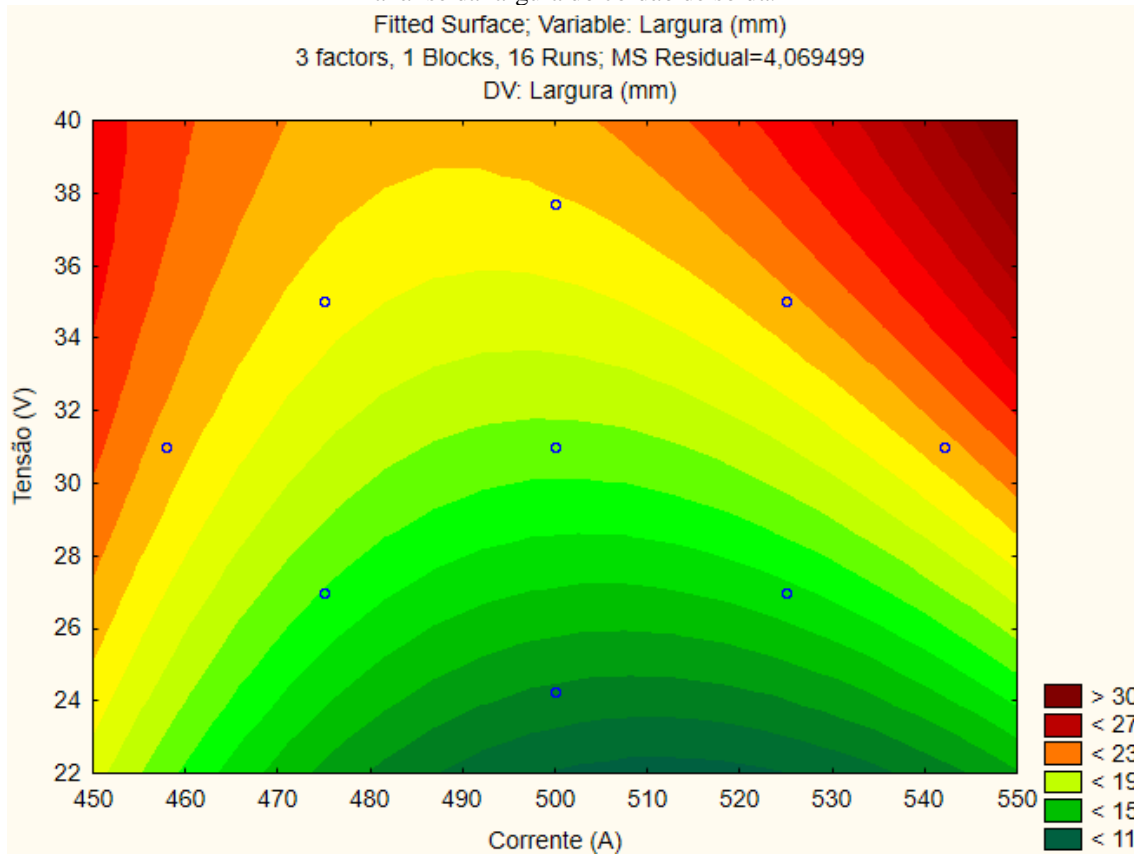


**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Com base na figura 23, é possível verificar que para altos valores de corrente e tensão, assim como para menores valores de corrente e valores maiores de tensão, tem-se valores de largura para o cordão de solda superiores a 30 mm. Além de que, para um valor de corrente em torno de 500 A e uma tensão próxima aos 23 V, tem-se uma região de tonalidade verde escuro que contém valores de largura do cordão de solda abaixo dos 11 mm, ou seja, os menores valores para largura.



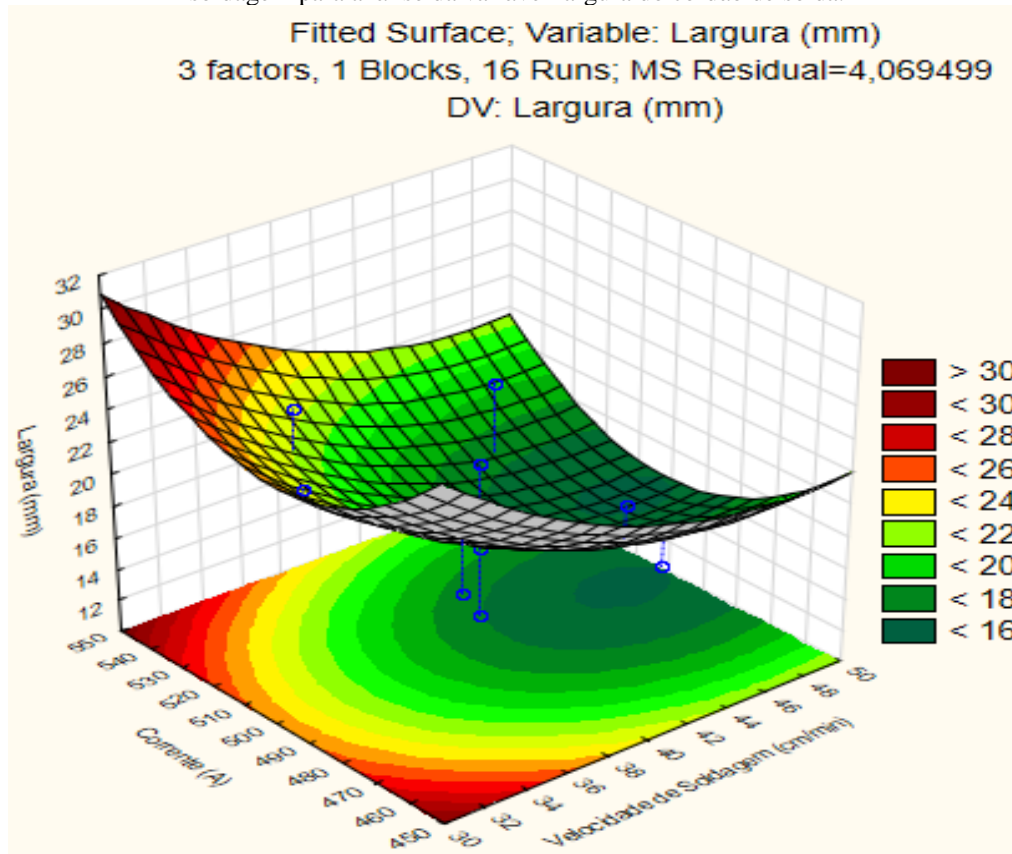
**Figura 23:** Curvas de níveis obtidas a partir da superfície de controle que relaciona tensão e corrente para análise da largura do cordão de solda.



**Fonte:** Elaborado pelos autores.

A partir da equação que relaciona a corrente e a velocidade de soldagem, foi possível obter a superfície quadrática figura 24. De tal maneira que, os valores máximos de largura se encontram próximos ao ponto crítico, que de acordo com o quadro 9, possuem os respectivos valores de corrente e velocidade de soldagem: 478,1731 A e 45,4738 cm/min.

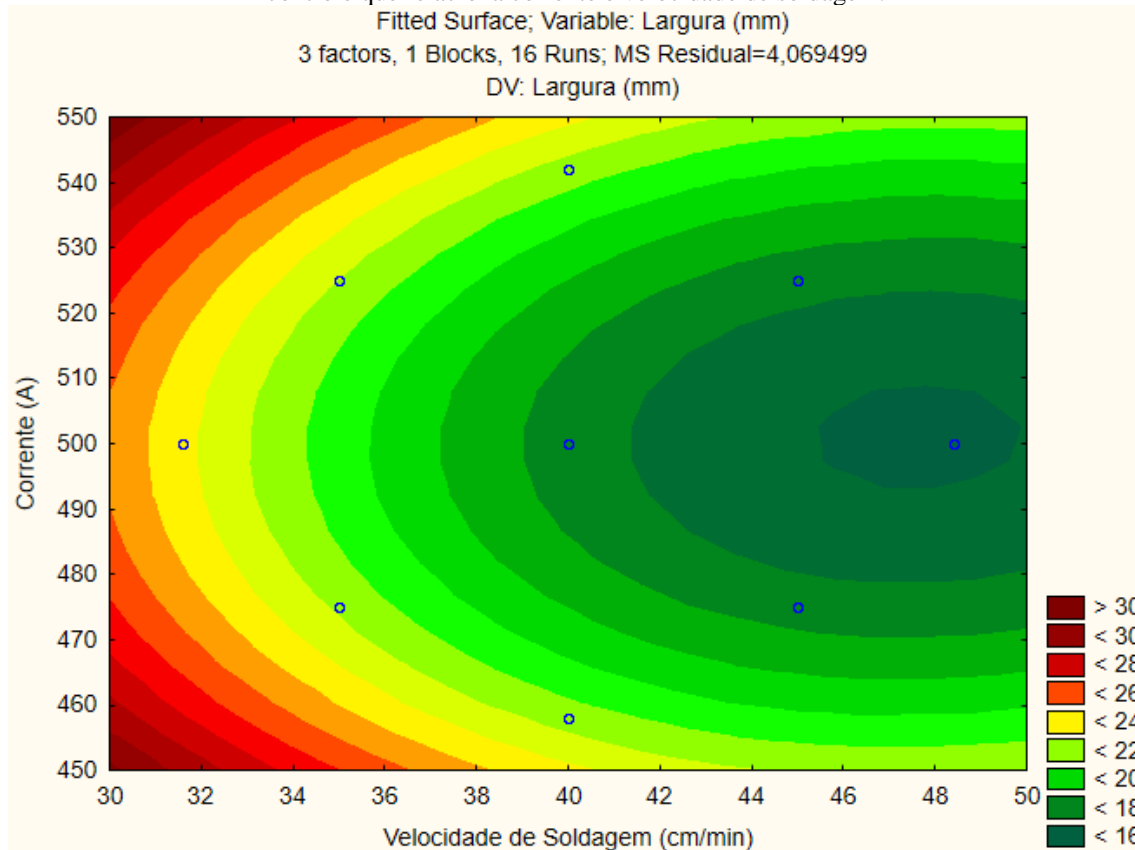
**Figura 24:** Superfície quadrática formada pela combinação das grandezas corrente e velocidade de soldagem para análise da variável largura do cordão de solda.



**Fonte:** Elaborado pelos autores.

De acordo com a figura 25, para menores valores de velocidade de soldagem tem-se maiores taxas de deposição de metal de base, o que origina maiores valores de largura. Percebe-se também que, a corrente influencia na variável dependente pois existe duas regiões no gráfico que maximiza a largura para um valor menor ou um valor maior de corrente. Ainda de acordo com a figura, é possível notar que houve regiões com valores de largura maiores do que 30 mm e com valores de largura inferiores a 16 mm.

**Figura 25:** Análise da largura do cordão de solda a partir de curvas de níveis obtidas da superfície de controle que relaciona corrente e velocidade de soldagem.



Fonte: Elaborado pelos autores.

## 7. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos podemos afirmar que as variáveis independentes tensão, corrente e velocidade de soldagem não necessariamente possuem relações linearmente proporcionais com as variáveis dependentes penetração, reforço e largura, pois o que de fato acontece é a existência de uma variável independente que exerce um maior grau de influência na variável dependente em relação as outras variáveis do processo, porém apesar dessas variáveis serem menos influentes ainda assim impactam no comportamento final da função, fazendo assim com que esse comportamento não seja predominantemente linear.

A partir das curvas de níveis obtidas das superfícies de resposta foi possível determinar as faixas de valores que maximizam e minimizam as variáveis penetração,

reforço e largura, com base nas regiões formadas pelas combinações realizadas entre as variáveis independentes tensão, corrente e velocidade de soldagem. De tal maneira que, entre os valores máximos e mínimos das variáveis dependentes é possível determinar valores intermediários de penetração, reforço e largura, que podem ser utilizados de acordo com uma aplicação específica, uma vez que não necessariamente os valores máximos ou mínimos são os requeridos para uma determinada aplicação.

Logo, com o conhecimento desses dados fornecidos pelas curvas de níveis, é possível ajustar os parâmetros iniciais de trabalho do processo de soldagem para obter os valores desejados ao fim do processo, evitando assim o desperdício e o custo extra com matéria prima, pois não será necessário realizar testes para determinar os parâmetros desejados. Além de que, tem-se uma maior produtividade durante o processo de soldagem, pois o tempo destinado a soldagem experimental para determinar tais parâmetros será reduzido apenas para ajuste dos parâmetros iniciais da máquina de solda, otimizando assim o processo com redução do lead time.

Outro ponto é que com a determinação correta dos parâmetros soldagem foi possível garantir a segurança operacional, tendo em vista, que qualquer falha na determinação dos parâmetros de soldagem afeta a qualidade da solda e conseqüentemente a integridade do vaso de pressão.

## REFERÊNCIAS

VILLANI, Paulo; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. Elsevier Brasil, 2016.

PRASAD, K. Siva et al. Application of design of experiments to plasma arc welding process: a review. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 34, n. 1, p. 75-81, 2012.

CARPINETTI, Luiz Cesar Ribeiro et al. **Planejamento e análise de experimentos**. 2009.

BARBETTA, Pedro Alberto; REIS, Marcelo Menezes; BORNIA, Antonio Cezar. **Estatística: para cursos de engenharia e informática**. São Paulo: Atlas, 2004.

FÁVERO, Luiz Paulo; BELFIORE, Patrícia. **Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com Excel®, SPSS® e STATISTICA®**. Elsevier Brasil, 2017.

TELLES, Pedro Carlos da Silva. **Vasos de pressão**. Rio de Janeiro, v. 2, 1996.

NETO, Benício Barros; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. **Como Fazer Experimentos-: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**. Bookman Editora, 2010.

PHILLIPS, Arthur L.; WEISMAN, Charlotte. **Welding handbook**. 1976.