

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MAG PULSADO: EFEITOS DOS PARÂMETROS DE PULSO SOBRE A DILUIÇÃO EM  
CORDÕES DE SOLDA DEPOSITADOS COM ER316 LSI

por

Luiz Antônio da Silveira Costa

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, agosto de 2023

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

## CIP - Catalogação na Publicação

da Silveira Costa, Luiz Antônio  
MAG PULSADO: EFEITOS DOS PARÂMETROS DE PULSO SOBRE  
A DILUIÇÃO EM CORDÕES DE SOLDA DEPOSITADOS COM ER316  
LSI / Luiz Antônio da Silveira Costa. -- 2023.  
22 f.  
Orientador: Arnaldo Ruben Gonzalez.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2023.

1. MAG Pulsado. 2. Diluição. 3. Box-Behnken. 4.  
Variação de parâmetros. I. Ruben Gonzalez, Arnaldo,  
orient. II. Título.

Luiz Antônio da Silveira Costa

MAG PULSADO: EFEITOS DOS PARÂMETROS DE PULSO SOBRE A DILUIÇÃO EM  
CORDÕES DE SOLDA DEPOSITADOS COM ER316 LSI

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignacio Iturrioz  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: **Processos de Fabricação**

Orientador: Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Comissão de Avaliação:

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez (Presidente)

Prof. José Antônio E. Mazzaferro

Prof<sup>ª</sup>. Cintia Cristiane Petry Mazzaferro

Porto Alegre, agosto de 2023

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Rosa Maria da Silveira Costa e Luiz Vanderlei Pacheco Costa, por todo esforço que fizeram ao longo de suas vidas, pela educação que me deram, pelo ambiente familiar, pelas lições de vida, pela inspiração para que hoje eu possa estar alcançando o título de engenheiro mecânico.

À minha esposa, Adrielen Pereira Rolin, e à minha filha, Luiza Rolin Costa, pelo amor e companheirismo ao longo de todo esse período, pela compreensão nos momentos em que não pude estar presente, por serem minha fonte de motivação para que eu nunca desistisse, pelo suporte emocional e principalmente pela formação da nossa família, sem vocês duas eu não teria alcançado esse objetivo.

Aos meus irmãos, Cleber da Silveira Costa e Camila da Silveira Costa, pelo suporte que deram ao longo desses anos, em todos os momentos em que precisei eu pude contar com vocês, não poderia ter tido irmãos melhores.

Ao Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez, pela oportunidade de ser bolsista no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC), pela orientação neste trabalho e pela ajuda durante diversos momentos durante o curso.

A todos os amigos que pude fazer durante a minha jornada na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

*“Os únicos limites das nossas realizações de amanhã  
são as nossas dúvidas e hesitações de hoje.”*

*Franklin Roosevelt*

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2023

**MAG PULSADO: EFEITOS DOS PARÂMETROS DE PULSO SOBRE A  
DILUIÇÃO EM CORDÕES DE SOLDA DEPOSITADOS COM ER316  
LSI**

**Silveira Costa, Luiz Antônio da**

luiz\_scrs@hotmail.com

**Resumo.** O trabalho aborda a investigação da soldagem utilizando o processo MAG pulsado como uma opção viável para unir chapas de menor espessura, na fabricação de vasos de pressão, na indústria automotiva e na soldagem de revestimento. Este processo oferece a vantagem de uma maior velocidade de soldagem ao mesmo tempo em que é necessária reduzida energia de soldagem. Na fase experimental do estudo, foram variados os parâmetros correntes de pico, tempo de base e velocidade de soldagem. O objetivo principal foi avaliar o efeito desses parâmetros sobre a diluição, os cordões de solda foram realizados sobre a superfície livre (bead-on-plate) da chapa e posição 1G. O projeto experimental Box-Behnken foi aplicado para execução dos cordões de solda e para otimizar a diluição. Através da análise estatística das variáveis avaliadas, foi possível determinar o grau de importância de cada uma delas. As conclusões destacaram que, a fim de diminuir a diluição, é necessário aumentar o Tempo de Base e diminuir a Velocidade de Soldagem. Em resumo, este estudo demonstra que o processo de soldagem MAG pulsado é eficaz quando se busca uma menor diluição (aporte térmico), especialmente em cenários que envolvem soldagem de revestimento.

**Palavras-chave:** MAG Pulsado; Diluição; Box-Behnken; Variação de parâmetros.

**Pulsed GMAW: Effects of pulse parameters on dilution in weld beads deposited with ER316lsi**

**Abstract.** The study addresses the investigation of welding using the pulsed GMAW process as a viable option for joining thinner sheets, particularly in contexts like pressure vessel manufacturing, the automotive industry, and cladding welding. This process offers the advantage of higher welding speed while requiring reduced welding energy. In the experimental phase of the study, variations were made in peak current, base time, and welding speed parameters. The main objective was to evaluate the effect of these parameters on dilution; weld beads were performed on the free surface (bead-on-plate) of the plate and in the 1G position. The Box-Behnken experimental design was applied to execute the weld beads and optimize dilution. Through statistical analysis of the evaluated variables, it was possible to determine the degree of importance of each. The conclusions highlighted that, in order to decrease dilution, it is necessary to increase the Base Time and decrease the Welding Speed. In summary, this study demonstrates that the pulsed GMAW welding process is effective when seeking lower dilution (thermal input), especially in scenarios involving cladding welding.

**Keywords:** Pulsed MAG; Dilution; Box-Behnken; Parameter variation.

## 1. INTRODUÇÃO

A soldagem se refere a um processo de união de dois materiais, geralmente metais ou termoplásticos, causando coalescência. Isso é tipicamente feito através da fusão das peças de trabalho e adicionando um material de adição para formar uma poça de fusão que esfria para formar uma junta com propriedades similares às do material base.

No contexto da soldagem a arco elétrico com proteção gasosa, ocorre a união de componentes metálicos por intermédio do processo de fusão, onde um arco elétrico é criado entre um arame continuamente alimentado e a peça a ser soldada. Isso ocorre em um ambiente isolado por um fluxo de gás protetor, o que previne a contaminação do metal pelo oxigênio do ar atmosférico [Fisher, A.].

De forma geral, ao realizar a soldagem de união em aços estruturais e aços de construção mecânica de baixo teor de carbono, não costuma surgir nenhum problema decorrente da diluição. Isso se deve ao fato de que os consumíveis empregados, sejam varetas, arames ou eletrodos, são completamente compatíveis com o metal de base. No entanto, quando a soldagem envolve materiais dissimilares, isto é, quando um dos materiais de base ou o próprio consumível possui uma composição diferente dos demais, podem surgir desafios relacionados à diluição excessiva [Holanda, Gabriel B., Lima, Daniel A., Filho, Pedro P.R].

Uma das aplicações essenciais da soldagem dissimilar é a criação de revestimentos utilizados para proteção contra corrosão ou desgaste. Quando se trata da soldagem para criar revestimentos, o consumível empregado geralmente possui uma composição diferente daquela do metal de base. Os elementos de liga presentes no consumível (arame) são cuidadosamente ajustados para garantir o efeito desejado no revestimento resultante. Em muitos casos, o metal de base é composto por aço ao carbono. É importante perceber que, se ocorrer uma diluição significativa do metal de base durante o processo de soldagem, o depósito formado pode não exibir a resistência necessária para atender às demandas específicas do revestimento pretendido [Holanda, Gabriel B., Lima, Daniel A., Filho, Pedro P.R].

Este trabalho terá como foco apresentar as características do processo de soldagem MAG Pulsado, com transferência axial projetado a fim de contribuir com pesquisas acadêmicas e industriais discutindo os resultados obtidos a partir das variações dos parâmetros de soldagem. A característica avaliada no presente trabalho será a diluição, resposta determinada através da geometria dos cordões de solda os quais foram mensurados através de análise macrográfica.

Pretende-se investigar e analisar, a partir da geometria do cordão de solda, a diluição – proporção na qual o metal de base fundido se mistura com o metal de adição para formar o metal de solda (composição da zona fundida), variando-se os parâmetros de soldagem do processo MAG Pulsado: corrente de pico ( $I_p$ ), tempo de base ( $T_b$ ) e velocidade de soldagem ( $V_s$ ). Utilizando o projeto de experimentos Box-Behnken os dados serão analisados utilizando três fatores de estudo variados em três níveis, onde 12 amostras são as combinações níveis baixos, médios e altos dos fatores, e 3 pontos centrais com os três parâmetros nos níveis médios.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO

### 2.1. Modos de transferência do metal

A transferência do metal de adição no processo de soldagem pode ser descrita como o transporte de gotas fundidas da ponta do eletrodo consumível para a poça de fusão. A característica da transferência do metal influencia diversos aspectos operacionais do processo, por exemplo, a posição de soldagem, a característica do cordão, a quantidade de respingos, formação de fumos, a estabilidade e o desempenho operacional do processo [Modenesi, Paulo].

De acordo com a classificação realizada pelo *International Institute of Welding* (IIW), os principais métodos de transferência são os seguintes:

- Transferência por curto-circuito: o metal é transferido por contato direto entre o eletrodo e a poça de fusão através de uma gota. Pode ser utilizado em qualquer posição.
- Transferência globular: com maiores correntes e tensão do que no caso anterior, o metal é transferido por glóbulos com diâmetro próximo ao eletrodo nu.
- Transferência por gotas repelidas: aumentando-se ainda mais a corrente a força eletromagnética se torna preponderante, sendo o eletrodo negativo ocorre elevação da densidade de corrente sobre a gota a qual provoca uma força eletromagnética que a impulsiona para cima.
- Transferência por gotas projetadas: uma ainda maior intensidade de corrente a gota na ponta do eletrodo diminui de diâmetro devido à menor tensão superficial causada pelo aumento da temperatura. Não havendo elevação da densidade de corrente no interior da gota, a força eletromagnética atua no sentido à poça de fusão devido à aceleração da gravidade.
- Transferência axial em aerossol (“spray”): utilizado com gases de proteção inertes ou fracamente oxidantes; devido ao aumento da corrente e da tensão, em relação aos modos anteriores, há maior penetração, com alta taxa de deposição.

Os fatores que determinam o modo de transferência do metal são a corrente de soldagem, o diâmetro do arame, o comprimento do arco (tensão), as características da fonte e o gás de proteção.

## 2.2. O processo MAG convencional

O processo de soldagem MAG (*Metal Activ Gas*) é notavelmente versátil, uma vez que pode ser aplicado em todas as posições de soldagem e é facilmente integrado à automação, sendo compatível com sistemas de produção robotizados. Em virtude disso, sua aplicação está se expandindo nos mais variados setores industriais. Nesse processo, o arco é formado entre um arame (eletrodo) desprovido de revestimento (nu), que é alimentado de forma contínua, e o metal base [Wainer, E.; Brandi, S. D.; Mello, F. D. H.]. Como não há revestimento no eletrodo, a proteção da poça de fusão e do próprio eletrodo contra a influência do ar atmosférico é assegurada pela utilização de um gás de proteção externo. Isso é fundamental para a estabilidade do arco elétrico e prevenir a formação de porosidades no cordão de solda e a inclusão de impurezas indesejadas.

As vantagens da utilização dos processos MAG, em comparação com processos de soldagem como eletrodo revestido, TIG e arco submerso, são diversas e notáveis. Além da capacidade de realizar soldagem em todas as posições e da facilidade de automação, algumas vantagens proeminentes incluem [Wainer, E.; Brandi, S. D.; Mello, F. D. H.]:

- Elevadas taxas de deposição, graças à capacidade de aplicar uma densidade de corrente considerável;
- Viabilidade de aplicação em uma ampla gama de ligas;
- Altas velocidades de soldagem;
- Ausência de formação de escória, já que o processo utiliza um eletrodo desprovido de revestimento.

### 2.3. O processo MAG pulsado

O modo de transferência axial projetado se caracteriza pela oscilação entre uma corrente baixa, chamada corrente de base ( $I_b$ ), e uma corrente alta, chamada corrente de pico ( $I_p$ ) ou corrente de pulso [Fischer, A]. Depois da ignição, o arco elétrico fica sempre aberto, sem formação de curtos-circuitos. Na Figura 1 pode-se visualizar a forma teórica de uma onda de corrente pulsada, compreende-se o modo de transferência axial projetado através de cinco fases que formam um ciclo completo:

- Fase 1 - A corrente de base serve principalmente para manter o arco aberto e o resfriamento do material de base e do eletrodo;
- Fase 2 - A subida da corrente para o nível de corrente de pulso;
- Fase 3 - O efeito “pinch” na ponta de eletrodo faz com que favoreça o destacamento da gota;
- Fase 4 - A diminuição da corrente de pico e separação da gota do eletrodo;
- Fase 5- A gota foi transferida para a poça de fusão.

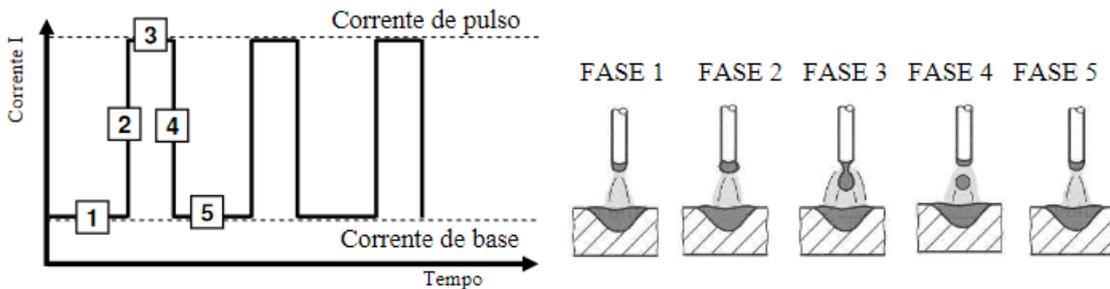


Figura 1 – Forma teórica de uma onda pulsada e as cinco fases que formam um ciclo completo do processo de transferência pulsado [Fischer, A]

O objetivo é transferir, em cada período de pulso da corrente, uma gota de metal fundido do eletrodo para a poça de fusão, também conhecida como UGPP – uma gota por pulso. As vantagens principais do processo são:

- Aplicável numa ampla faixa de potência de soldagem, para chapas finas e espessas;
- Soldagem e brasagem de vários materiais como, por exemplo, aço comum, aço inoxidável e alumínio;
- Transferência do metal sem curto-circuito e sem formação de salpicos;
- Alta qualidade das propriedades mecânicas e das características visuais da solda;
- Possibilidade de reduzir a energia do processo em comparação com a transferência por aerossol;
- Aumento da velocidade de soldagem e taxa de deposição em comparação com transferência por curto circuito e globular;
- Aplicação de arames com maior diâmetro na soldagem de chapas finas;
- Redução na geração de fumos.

## 2.4. Diluição

A diluição na soldagem é uma métrica expressa em porcentagem, calculada pela relação entre a massa do metal de base fundido e a massa total do cordão de solda. Essa relação também pode ser determinada por meio da comparação das áreas correspondentes [Holanda, Gabriel B., Lima, Daniel A., Filho, Pedro P.R].

Em aplicações que abrangem a soldagem de revestimentos, é frequentemente necessário reduzir a diluição. Isso pode ser alcançado mediante a variação dos parâmetros de soldagem, tais como a velocidade de avanço, a corrente utilizada, o tipo de eletrodo empregado, entre outros fatores. O objetivo é minimizar a incorporação do metal de base fundido no cordão de solda, visando manter as características desejadas do revestimento.

Na Figura 2 é possível identificar as áreas que são utilizadas para a determinação da diluição. A parte superior do cordão de solda, em azul, é denominada de área de reforço ( $A_{ref}$ ); a parte inferior do cordão de solda, em verde, é denominada de área fundida do metal base ( $A_p$ ).

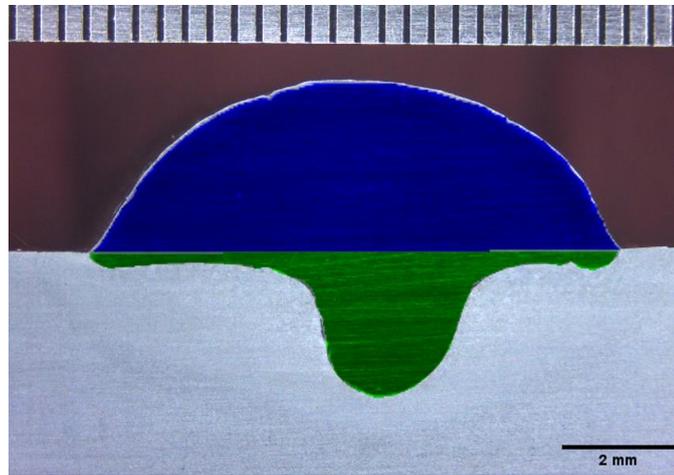


Figura 2 – Áreas utilizadas para a determinação da diluição: área do reforço ( $A_{ref}$ ), em azul e área fundida do metal base ( $A_p$ ), em verde

Com as áreas identificadas, pode calcular-se a diluição com a Equação 2.1 [Fischer, A]:

$$D(\%) = \left( \frac{A_p}{A_p + A_{ref}} \right) \cdot 100 \quad (2.1)$$

Em que:

$D$  = diluição (%);

$A_p$  = área fundida do metal base ( $\text{mm}^2$ );

$A_{ref}$  = área do reforço ( $\text{mm}^2$ ).

## 2.5. Metodologia de superfície de resposta

A metodologia de superfície de resposta (MSR) é, atualmente, o mais popular conjunto de técnicas para otimização, devido a sua completa teoria, eficiência e simplicidade [Box; Drapper, 1987; Liu *et al*, 2013; Wu *et al*, 2012; Raffin *et al*, 2011]. A MSR engloba diversos métodos matemáticos e estatísticos que permitem estabelecer as relações entre a resposta de um processo e suas variáveis independentes. Através da aplicação da MSR, é possível analisar o impacto das variáveis independentes, tanto individualmente quanto em suas interações, sobre a variável dependente ou resposta do processo.

O estudo de otimização utilizando a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) pode ser dividido em três fases distintas. A primeira fase compreende o trabalho preliminar, durante o qual os parâmetros independentes são identificados e seus níveis são definidos. A segunda fase envolve a seleção do projeto experimental, a formulação da equação do modelo por meio de estimativas e a subsequente validação. A última fase consiste na construção do gráfico da superfície de resposta e do gráfico de contorno de resposta, que representam a relação entre a variável dependente e os parâmetros independentes. Além disso, nessa última fase são determinados os pontos ótimos que maximizam ou minimizam a resposta do processo.

## 2.6. Projeto de experimentos Box–Behnken

O projeto de experimentos é amplamente empregado em diversas áreas do conhecimento, com o objetivo de planejar, executar e analisar experimentos por meio de uma metodologia científica respaldada por conceitos estatísticos. Essa abordagem é utilizada para otimizar sistemas ou processos, passando por várias etapas, que se iniciam pela identificação do problema e das características cruciais do processo.

Os métodos de projeto de experimentos, como o Box-Behnken e o MSR (Metodologia de Superfície de Resposta), foram aplicados para investigar os efeitos de três variáveis independentes corrente de pico ( $I_p$ ), tempo de base ( $T_b$ ) e velocidade de soldagem ( $V_s$ ), a fim de determinar as condições adequadas para obter um cordão de solda de qualidade aceitável e minimizar a diluição.

Na abordagem MSR, há vários tipos de projetos de experimentos possíveis, sendo que neste trabalho optou-se por utilizar o projeto Box-Behnken, que requer apenas 15 ensaios para três parâmetros. Esse é um dos projetos que exige o menor número de experimentos em comparação com outros métodos. O projeto Box-Behnken, baseado em três níveis fatoriais incompletos, é caracterizado por sua propriedade de rotacionalidade e pela possibilidade de obter o modelo matemático mediante uma regressão polinomial de segunda ordem [Myers e Montgomery, 2002; Montgomery, 2013; Ferreira et al., 2007; Box e Behnken, 1960].

Este tipo de projeto de experimento é composto por três partes, cada uma contendo quatro ensaios. Cada parte consiste em dois fatores dispostos em um projeto fatorial completo de dois níveis, enquanto o terceiro fator é fixado em zero (ponto médio). Os pontos experimentais são localizados na superfície de uma esfera centrada na origem do sistema de coordenadas e tangente ao ponto central de cada face do cubo [Box e Behnken, 1960].

O projeto Box-Behnken com três fatores requer apenas 12 ensaios, além de réplicas no ponto central. Geralmente, o número de pontos experimentais é dado por  $2k(k-1) + C_0$ , onde  $k$  é o número de fatores e  $C_0$  é o número de réplicas no ponto central. Adicionalmente, cada fator é examinado em três níveis, o que é uma característica vantajosa em determinadas situações experimentais [Box e Behnken, 1960].

Uma vez que o projeto de experimento é escolhido, a equação do modelo é estabelecida e os coeficientes são estimados. Em muitos casos na área de Superfície de Resposta, a forma do relacionamento entre as variáveis dependentes e independentes é desconhecida. Portanto, o primeiro passo é obter uma aproximação para essa relação verdadeira. Isso geralmente é alcançado por meio de uma regressão polinomial de baixa ordem em uma região das variáveis independentes. Por exemplo, o modelo de regressão polinomial de primeiro grau pode ser expresso como [Box e Behnken, 1960]:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots + \beta_k \cdot x_k + \varepsilon \quad (2.2)$$

O modelo de segunda ordem é dado por [Box e Behnken, 1960]:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j>1}^k \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \varepsilon \quad (2.3)$$

Na qual  $\beta_0$ ,  $\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$  e  $\beta_{ij}$  são os coeficientes de regressão da interseção, linear, os coeficientes quadráticos e de interação, respectivamente, e  $x_i$  e  $x_j$  são as variáveis independentes.

Os coeficientes dos modelos podem ser estimados eficientemente se for usado um projeto experimental adequado para a coleta de dados.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Equipamento e material

Para a parte prática deste estudo, foram empregados os recursos e instalações do Laboratório de Soldagem e Técnica Conexas (LS&TC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), situado no Centro de Tecnologia, no Campus do Vale.

Foram utilizadas como metal-base chapas de aço SAE 1010 de 150 mm x 50 mm x 12 mm. Os cordões de solda foram realizados sobre a superfície livre (*bead-on-plate*) e posição 1G.

O comprimento das chapas foi determinado para permitir a estabilização do arco elétrico, e a largura foi selecionada para assegurar a dispersão térmica sem que o calor retorne para a junta de solda, garantindo, assim, a obtenção de dados representativos do processo.

O gás de proteção empregado foi um gás ativo Ar + 2% O<sub>2</sub>, com uma vazão de 15 l/min. O metal de adição utilizado foi o arame AWS A5.9 ER316 LSi, com diâmetro de 1,2 mm.

Para a soldagem foi utilizada a fonte DIGPlus A7, multiprocessado com processador de 32 bits do LS&TC. Esta fonte é capaz de realizar soldas MAG de correntes contínuas com controle de tensão ou corrente. Para este trabalho foi utilizado o controle de corrente para obtenção do modo pulsado.

Para automatizar e realizar a soldagem MAG, empregou-se um sistema robotizado composto por uma fonte *TransPuls Synergic 4000 R* da marca *Fronius* e um robô MA1400 da marca *Yaskawa Motoman Robotics*. Essa configuração possibilitou o controle da repetitividade ao longo do processo de soldagem dos corpos de prova.

O acompanhamento dos testes foi realizado por intermédio do sistema de aquisição de dados SAP-v40.1, desenvolvido pela IMC Soldagem [IMC Soldagem & LABSOLDA UFSC, 2005]. Esse sistema é equipado com sensores para mensurar os sinais de corrente, tensão, velocidade de alimentação do arame e vazão do gás de proteção. Ademais, o sistema inclui um software que possibilita a captura e registro desses sinais.

A etapa de corte das chapas soldadas foi conduzida pela máquina de corte *cut-off*, a qual utiliza um disco refrigerado para executar o corte. Esse procedimento visou prevenir que o calor gerado pelo corte alterasse as propriedades dos cordões de solda. Para garantir que a análise dos cordões fosse realizada em uma região em que o arco elétrico estivesse estabilizado, optou-se por realizar os cortes dos cordões na região central, no sentido longitudinal das chapas, como pode ser visto no Apêndice A. Para preparar as amostras, foram empregadas sequências de lixamento com lixas graduadas (100, 180, 220, 320, 400, 600 e 1200). As superfícies alcançadas por meio da lixa de granulometria 1200 demonstraram ser adequadas para a realização da macrografia e para a análise das imagens.

O ataque químico das amostras foi realizado utilizando Nital a 10%, preparado no próprio LS&TC. As faces das amostras foram submetidas ao ataque até que fosse perceptível por inspeção visual a distinção clara das áreas a serem analisadas. A atenção principal foi direcionada ao cordão de solda e à Zona Afetada pelo Calor (ZAC).

As imagens macrográficas foram obtidas por meio do escaneamento das amostras e do ajuste de brilho e contraste para viabilizar a visualização otimizada. A análise dos dados coletados foi executada utilizando o software ImageJ.

### 3.2. Parâmetros

A regulagem da corrente e tensão de soldagem com arco pulsado é caracterizada por um grande número de parâmetros. Em fontes modernas as possibilidades de regulagem podem chegar a 40 parâmetros ou mais.

No entanto, para o presente trabalho, o pulso de corrente para o processo de soldagem MAG Pulsado há quatro parâmetros independentes, onde neste experimento foram mantidos dois ( $I_b$  e  $T_p$ ) constantes e os outros dois ( $I_p$  e  $T_b$ ) foram variados em três níveis cada. Com o objetivo de entender o comportamento dos parâmetros foram variados a corrente de pico ( $I_p$ ) entre 280, 315 e 350 A e o tempo de base ( $T_b$ ) entre 4, 6 e 8 ms. Visando atingir a estabilidade do arco elétrico tempo de pico ( $T_p$ ) foi mantido constante em 3,5 ms e para a não extinção do arco elétrico, a intensidade da corrente de base ( $I_b$ ) foi mantida constante em 40 A, conforme a Tabela 1. Os parâmetros foram selecionados com base em estudos realizados anteriormente no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC) aos quais o arco elétrico apresentou estabilidade adequada para realização dos cordões, como por exemplo o trabalho de conclusão de curso de Boeira, Alexandre. Os demais parâmetros do processo de soldagem foram mantidos constantes conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do Processo de Soldagem

Parâmetros			Nível		
Descrição	Unidade	Símbolo	Baixo (-1)	Médio 0	Alto (+1)
Corrente de Pico	A	$I_p$	280	315	350
Tempo de base	ms	$T_b$	4,0	6,0	8,0
Velocidade de soldagem	mm/s	$V_s$	4,0	5,0	6,0
Corrente de base	A	$I_b$	40,00		
Tempo de pico	ms	$T_p$	3,50		
Ângulo de deslocamento da tocha	°	$\theta$	0		
Distância bico de contato peça	mm	DBCP	18,00		
Vazão gás de proteção	l/min	$V_g$	15,00		

A velocidade de alimentação do arame ( $W$  – m/min) foi ajustada entre os ensaios com o propósito de manter a tensão de soldagem aproximadamente em 25,5 V (vide Apêndice I).

Na Tabela 2 é apresentada a sequência aleatorizada de soldagem dos corpos de prova de acordo com a combinação dos níveis dos fatores controláveis.

Tabela 2 – Sequência dos ensaios e as suas respectivas respostas, para cada cordão de solda

Sequência de ensaios	Fatores			Resposta
	Ip (A)	Tb (ms)	Vs (mm/s)	Diluição (%)
1	350	6,0	4,0	26,89
2*	315	6,0	5,0	28,30
3	315	4,0	6,0	31,13
4	350	8,0	5,0	24,37
5	315	8,0	4,0	22,83
6	315	8,0	6,0	27,65
7	280	4,0	5,0	28,00
8*	315	6,0	5,0	27,08
9	280	6,0	4,0	24,51
10	280	8,0	5,0	22,97
11	280	6,0	6,0	27,65
12	350	6,0	6,0	29,64
13	315	4,0	4,0	28,03
14*	315	6,0	5,0	27,22
15	350	4,0	5,0	28,96

Observação: valores com (\*) são os níveis médios dos fatores ou pontos centrais

Em que:

Ip = corrente de pico (A);

Tb = tempo de base (ms);

Vs = velocidade de soldagem (mm/s).

A partir dos resultados de diluição obtidos experimentalmente e comparando-os com os trabalhos de P. Yadav, P. Khanna e M.Nouri, A.Abdollah-zadeh, F.Malek, percebe-se que para menores valores de velocidade de soldagem (Vs) menores são os valores de diluição.

Anteriormente, na seção 2.4, foi descrito o método para a determinação da diluição ao qual é realizado com base na Equação 2.1 da mesma seção. Para traçar a área fundida do metal base (Ap) e a área do reforço (Aref) foi utilizado o software ImageJ, um exemplo de como é realizado a demarcação das áreas pelo software é demonstrado na Figura 3.

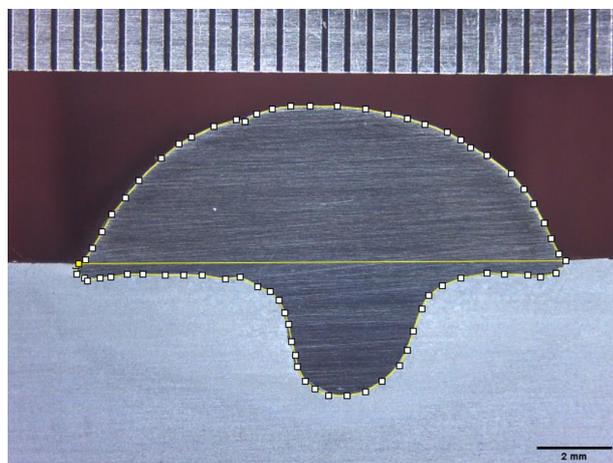


Figura 3 – Áreas demarcadas, utilizando o software ImageJ para determinação da diluição

Nos Apêndices B e C encontram-se maiores informações a respeito dos cordões de solda bem como imagens de todas as 15 amostras.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Análises e discussões

Realizadas as medições das áreas, área fundida do metal base ( $A_p$ ) e a área do reforço ( $A_{ref}$ ), das 15 chapas soldadas pelo processo MAG Pulsado utilizando o gás de proteção Ar+2%O<sub>2</sub> para cada combinação de parâmetros foram obtidos os valores da diluição, como pode ser observado na Tabela 2 da seção anterior.

A Tabela 2 mostra o projeto de experimentos Box-Behnken com os três parâmetros controláveis de processo e os valores da diluição para cada ensaio – combinação dos valores de cada parâmetro – o tratamento dos dados através das técnicas estatísticas.

Na Tabela 3 apresenta-se a Análise de Variância (ANOVA) para a diluição (D - %). O valor-p pode ser utilizado na determinação da significância dos fatores principais ou interações sobre a diluição. Esse valor é um indicador que quantifica a significância com relação à resposta. O termo valor-p é conhecido pela probabilidade de significância, caso apresente valores superior a 0,05 (5%) pode-se rejeitar a hipótese nula (fator não é significativo) com 95% de confiança.

Mediante a ANOVA foi determinada que os parâmetros principais  $I_p$ ,  $T_b$  e  $V_s$  têm efeito significativo na diluição para um nível de significância  $\alpha = 0,05$  (Valor-p < 0,05), todos eles em fator linear. Entretanto, as interações ( $I_p*T_b$ ,  $I_b*V_s$  e  $T_b*V_s$ ) não apresentam efeito significativo sobre a diluição para um nível de significância moderado  $0,05 < \alpha \leq 0,10$  ( $0,05 < \text{Valor-p} \leq 0,10$ ).

Na Figura 4 está representada a proporção dos efeitos ou contribuição da Tabela 5.1 que cada fator representa em relação ao total dos efeitos, mostrando assim uma grande parcela da influência dos efeitos para os fatores individuais, a contribuição do  $T_b$  sobre a diluição é de 52,77%,  $V_s$  é de 30,06% e  $I_p$  de 7,17%. Entretanto, a contribuição das interações  $I_p*I_p$  representa um valor de 3,32%,  $T_b*T_b$  um valor de 1,97% e  $V_s*V_s$  um valor de 1,11%.

Tabela 3 – ANOVA dos fatores  $I_p$ ,  $T_b$  e  $V_s$  sobre diluição

Fonte	GDL	SQ	MQ	Valor F	Valor-P	Contribuição
$I_p$ (A)	1	5,6922	5,6922	14,07	0,013	7,17%
$T_b$ (ms)	1	41,8775	41,8775	103,49	0,000	52,77%
$V_s$ (mm/s)	1	23,8513	23,8513	58,94	0,001	30,06%
$I_p$ (A)* $I_p$ (A)	1	2,6634	2,6634	6,58	0,050	3,32%
$T_b$ (ms)* $T_b$ (ms)	1	1,3826	1,3826	3,42	0,124	1,97%
$V_s$ (mm/s)* $V_s$ (mm/s)	1	0,8772	0,8772	2,17	0,201	1,11%
$I_p$ (A)* $T_b$ (ms)	1	0,0477	0,0477	0,12	0,745	0,06%
$I_p$ (A)* $V_s$ (mm/s)	1	0,0372	0,0372	0,09	0,774	0,05%
$T_b$ (ms)* $V_s$ (mm/s)	1	0,744	0,744	1,84	0,233	0,94%
Erro	5	2,0233	0,4047			2,55%
Total	14					100,00%

Nota: GDL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; MQ: Média dos Quadrados.

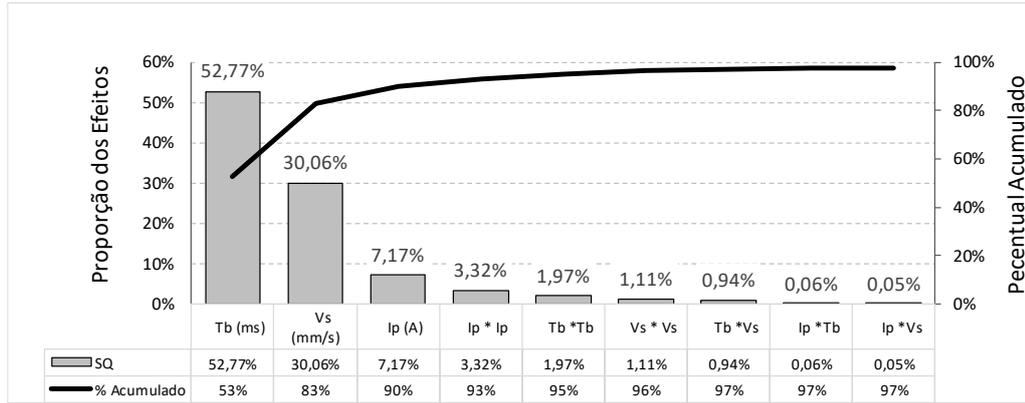


Figura 4 – Estimativa da proporção dos efeitos por fator para a diluição

A Figura 5 mostra o efeito da interação dos fatores  $I_p$  e  $T_b$  na diluição (%), a menor diluição 22,97% (verificar cordão 10, Apêndices I e II), encontrada para esses dois fatores é quando  $I_p = 280$  A e  $T_b = 8,0$  ms. Observa-se que os menores valores de diluição podem ser obtidos quando  $T_b = 8,0$  ms. Entretanto, quando  $T_b = 4,0$  ms e a  $I_p = 315$  A se consegue o valor da diluição maior que 29%.

A Figura 6 mostra o efeito da interação dos fatores  $I_p$  e  $V_s$  sobre a diluição (%), a menor diluição 24,51% (verificar cordão 9, Apêndices I e II) encontrada para esses dois fatores é quando  $I_p = 280$  A e  $V_s = 4,0$  mm/s.

A Figura 7 mostra o efeito da interação dos fatores  $T_b$  e  $V_s$  para diluição (%), a menor diluição 22,83% (verificar cordão 5, Apêndices I e II) encontrada para esses dois fatores é quando  $T_b = 8,0$  ms e  $V_s = 4,0$  mm/s.

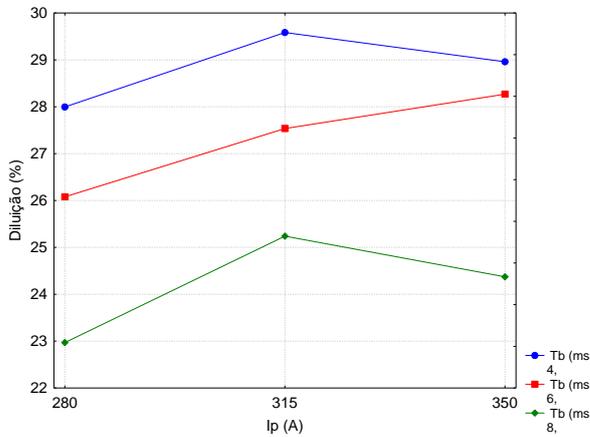


Figura 5 – Diluição (D) em função da corrente de pico ( $I_b$ ) e tempo de base ( $T_b$ )

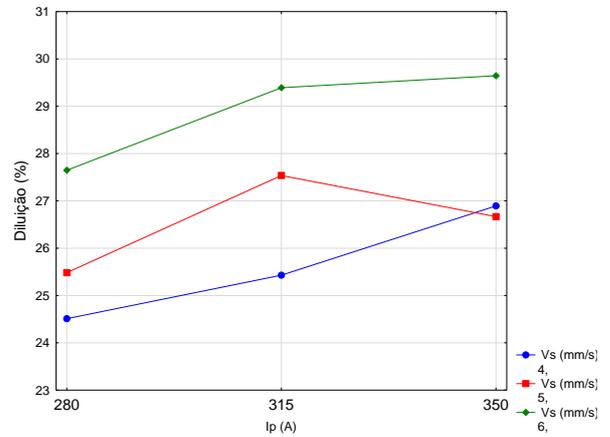


Figura 6 – Diluição (D) em função da corrente de pico ( $I_b$ ) e velocidade de soldagem ( $V_s$ )

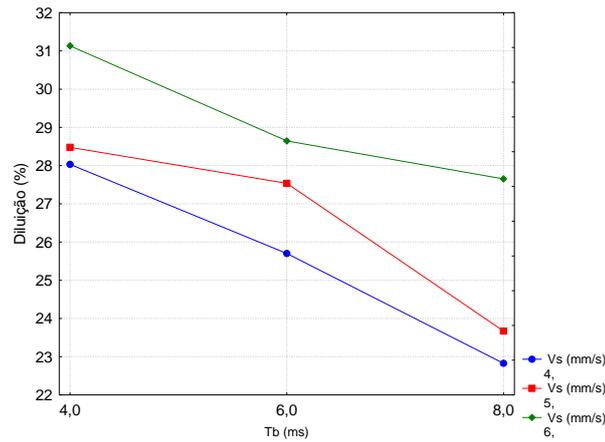


Figura 7 – Diluição (D) em função do tempo de base (Tb) e velocidade de soldagem (Vs)

Através da análise das Figuras 5, 6 e 7, verifica-se que a menor diluição encontrada é de 22,83% quando  $Tb = 8,0$  ms e  $Vs = 4,0$  mm/s. Por outro lado, verifica-se que se pode chegar a uma diluição de 31,13% (verificar cordão 3, Apêndices I e II) quando  $Tb = 4,0$  ms e  $Vs = 6,0$  mm/s, resultando em uma amplitude de 10,30%.

#### 4.2. Modelagem e otimização de parâmetros de processo

Mediante o modelo de regressão polinomial de segundo grau é possível determinar uma relação numérica entre a diluição (D - %) e as variáveis independentes, que em geral é desconhecida. O objetivo do uso da metodologia da superfície de resposta (MSR) é desenvolver um modelo matemático da superfície de resposta de segunda ordem com o melhor ajuste e encontrar o conjunto ótimo de parâmetros experimentais que produzam um valor máximo ou mínimo de resposta. Com base nos resultados obtidos a partir do projeto de experimentos Box-Behnken, um modelo de regressão de segunda ordem para a diluição (%) foi desenvolvido em termos dos valores reais (não-codificado) dos fatores e interações avaliados, ver a Equação 4.1.

$$\begin{aligned}
 D (\%)_{Regressão} = & (-38,9 + 0,465 I_p - 0,88 T_b - 3,57 V_s \\
 & - 0,000693 I_p * I_p - 0,1530 T_b * T_b + 0,487 V_s * V_s \\
 & + 0,00156 I_p * T_b - 0,00275 I_p * V_s + 0,216 T_b * V_s)
 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Em que:

$D_{Regressão}$  = diluição definida pela equação de regressão (%);

$I_p$  = corrente de pico (A);

$T_b$  = tempo de base (ms);

$V_s$  = velocidade de soldagem (mm/s).

A Figura 8 mostra o gráfico da superfície de resposta, em 3D, da diluição em função da interação corrente de pico ( $I_b$  - A) e tempo de base ( $T_b$  - ms) para velocidade de soldagem  $V_s = 6,0$  mm/s, e a Figura 10 mostra o gráfico de contorno obtido a partir dessa superfície de resposta da diluição (%) em função dos parâmetros  $T_b$  (ms) e  $I_p$  (A), mantendo constante  $V_s = 6,0$  (mm/s).

A análise da Figura 9 revela que a diluição diminui com a diminuição da corrente de pico (350 a 280 A) e o aumento do tempo de base (de 4 a 8 ms), a região de menor valor de diluição (< 23%) pode ser obtido quando  $I_p = 280$  A e  $T_b = 8,0$  ms.

O menor valor alcançado da diluição, quando  $I_b = 280$  A e  $T_b = 8,0$  ms e  $V_s = 6,0$  mm/s, pode ser pela menor energia de soldagem (calor transferido ao metal base). Como foi dito

anteriormente, em fontes modernas as possibilidades de regulação podem chegar a 40 parâmetros ou mais dificultando o a determinação de um ponto ótimo para o processo de soldagem. Assim sendo, o entendimento e explicação da alteração dos parâmetros da curva no calor transferido para a peça, geometria do cordão de solda e estabilidade do arco requer de mais estudos. A análise dos parâmetros mediante a metodologia de projeto de experimentos e metodologia da superfície de resposta são ferramentas que ajudam a explorar e encontrar a relação entre resposta e variáveis independentes.

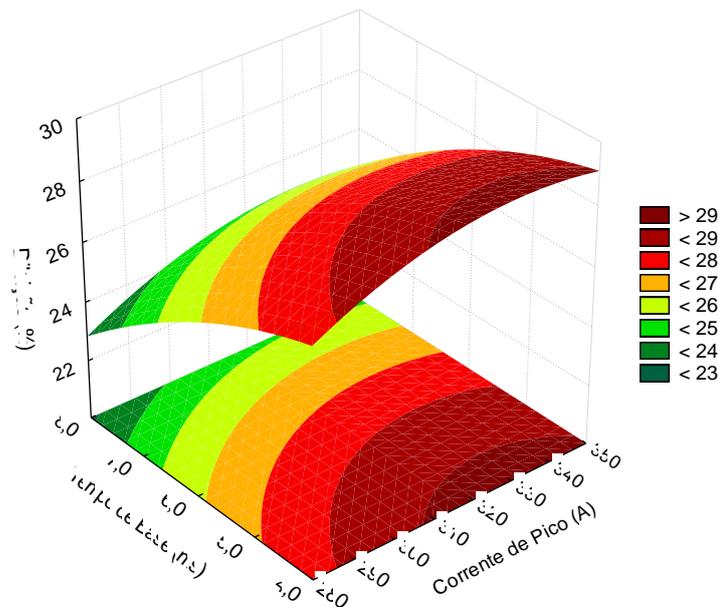


Figura 8 – Superfície de Resposta (3D) para a diluição (%) em função dos parâmetros  $T_b$  (ms) e  $I_p$  (A), mantendo constante  $V_s = 6,0$  (mm/s)

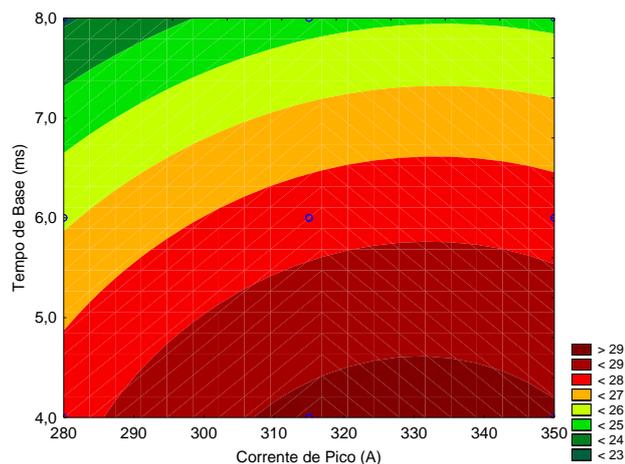


Figura 9 – Gráfico de contorno para a diluição (%) em função dos parâmetros  $T_b$  (ms) e  $I_p$  (A), mantendo constante  $V_s = 6,0$  (mm/s)

Na avaliação dos valores dos parâmetros  $I_p$ ,  $T_b$  e  $V_s$ , percebe-se que a diminuição de  $I_p$  e o aumento de  $T_b$ , favorece o resfriamento da peça, reduzindo a diluição no processo de soldagem. No processo MAG pulsado [Amin, 1983], durante a aplicação da corrente de base ocorre resfriamento da peça e quanto maior for o tempo de base, para o presente trabalho  $T_b =$

8,0 ms, menor será a diluição. Resumindo, o tempo de base favorece também o resfriamento da peça, por estar sustentando uma corrente de soldagem positiva baixa suficiente para manter aceso o arco elétrico, responsável apenas pela manutenção do arco elétrico.

### 4.3. Menor valor da diluição estimada

Derringer e Suich (1980) encontraram uma das soluções para otimizar várias respostas, desenvolvendo a função de conveniência ou método *desirability*, que tem sido amplamente utilizada desde então na indústria.

A função desejabilidade ou de conveniência de Derringer permite encontrar as condições experimentais (níveis de fator) para alcançar, simultaneamente, o valor alvo (objetivo) para todas as variáveis avaliadas, incluindo as prioridades dos pesquisadores durante o processo de otimização.

Foi determinada, mediante o software Minitab®, a função desejabilidade para uma resposta objetivo (vide Figura 10), o menor valor de diluição (21%), para isso é necessário ajustar os valores dos parâmetros: corrente de pico = 280 A, tempo de base = 8,0 ms e velocidade de soldagem = 4,0 mm/s.

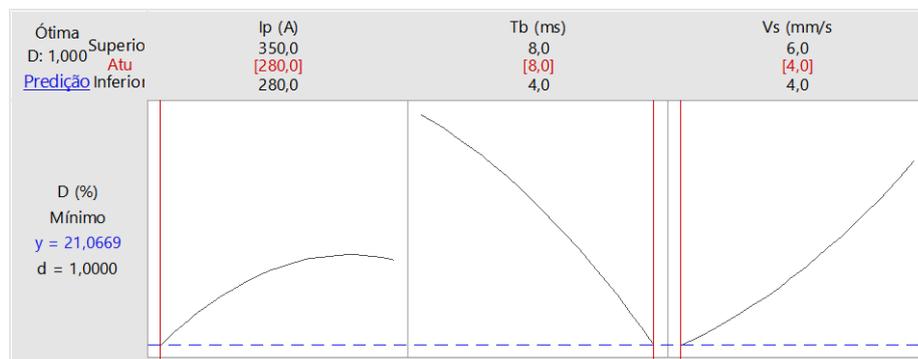


Figura 10 – Gráfico de otimização, combinação dos parâmetros para obter a menor diluição

## 5. CONCLUSÕES

Com base no estudo realizado, dos parâmetros da curva de corrente do processo MAG Pulsado, pode concluir-se que mediante a combinação adequada dos parâmetros dentro dos limites avaliados é possível obter a resposta desejada.

O projeto de experimentos Box-Behnken é adequado para a obtenção do modelo matemático/estatístico para estimar os valores da diluição.

Para a diluição, os parâmetros principais de corrente de pico ( $I_p$ ) e tempo de base ( $T_b$ ) e velocidade de soldagem ( $V_s$ ) se mostraram significativos. As interações dos parâmetros não apresentam efeitos significativos sobre a diluição. Com os parâmetros de soldagem ajustados para: corrente de pico,  $I_p = 315$  A, tempo de base,  $T_b = 8,0$  ms, e velocidade de soldagem,  $V_s = 4,0$  mm/s foi possível chegar a um resultado de 22,83% de diluição. O menor valor de diluição atribuído ao menor valor de velocidade de soldagem vai ao encontro de resultados encontrados em referências citadas.

A metodologia da superfície de resposta é uma ferramenta muito importante na obtenção do conjunto de condições do processo quando há necessidade de estimar a resposta alvo ou objetivo, os gráficos de contornos podem auxiliar a identificar a melhor região de interesse.

Para trabalhos futuros sugere-se realizar experimentos com os parâmetros ajustados de acordo com a função desejabilidade a fim de validar o menor valor de diluição (21%) determinado pela mesma.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amin, M., “**Pulse Current Parameters for Arc Stability and Controlled Metal Transfer in Arc Welding**”, Metal Construction, May, 15 (5), p.272-278, 1983.

AWS, Welding Handbook, “**Welding Processes, Part 1**”, 9th ed., Miami-USA. American Welding Society, v.2, 2004.

Boeira, A.C., “**Análise Dos Parâmetros De Soldagem No Processo Mag Pulsado Sobre A Penetração Em Junta Sobreposta - 2F**”, UFRG, Porto Alegre, 2017.

Yadav, P.; Khanna, P., “**Mathematical analysis of effect of input parameters on weld bead geometry and weld dilution for weld surfacing of 308L stainless steel on low carbon steel**”, Department of Mechanical Engineering, NSUT, New Delhi, India, 2022.

Nouri, M.; Abdollah-zadeh, A.; Maleka, F., “**Effect of Welding Parameters on Dilution and Weld Bead Geometry in Cladding**”, Department of Materials Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 2007.

Modenesi, P., “**Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais**”, UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2007.

Scotti, A.; Ponomarev, V. “**Soldagem MIG/MAG**”, 1. ed., Artliber, 2008.

Fischer, A., “**Estudo Da Influência Dos Parâmetros No Processo De Soldagem Gmaw-Arco Pulsado**”, Tese (Doutorado em Engenharia), UFMG, Belo Horizonte, 2011.

Box, G. E. P., & Draper, N. R. “**Empirical Model Building and Response Surfaces.**” John Wiley & Sons, Inc., New York, 1987.

Ferreira, S. L. C., Bruns, R. E., Ferreira, H. S., Matos, G. D., David, J. M., Brandão, G. C., et al. “**Box–Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods.**” Analytica Chimica Acta, 597(2), 179–186, 2007.

Holanda, Gabriel B., Lima, Daniel A., Filho, Pedro P.R., “**Uma nova abordagem para a medição da diluição de soldagem, baseada nos pontos de inflexão de um Contorno Ativo.**” Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Maracanaú, Ceará, Brasil..

Gonzalez, A.R., “**Efeito da Forma da Onda sobre as Características de Fusão na Soldagem MIG/MAG com Corrente Pulsada**”, Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

Montgomery, D. C. “**Design and analysis of experiments (6th ed.)**”. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005.

Myers, R. H., & Montgomery, D. C. “**Response surface methodology**”, 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.

Wainer, E.; Brandi, S. D.; Mello, F. D. H. “**Soldagem: Processos e Metalurgia**” 1. ed., Edgard Blücher, 1992.

## APÊNDICE

### A – Região dos cortes para análise dos cordões de solda



Figura A1 – Região dos cortes para análise dos cordões de solda

### B – Tabelas com os fatores de soldagem

Tabela B1 – Tabelas com todos os fatores envolvidos no processo de soldagem

Sequência de ensaios	Fatores				Resposta
	Ip (A)	Tb (ms)	Vs (mm/s)	Tensão (V)	Diluição (%)
1	350	6,0	4,0	24,5	26,89
<b>2 *</b>	<b>315</b>	<b>6,0</b>	<b>5,0</b>	<b>24,9</b>	<b>28,30</b>
3	315	4,0	6,0	26,9	31,13
4	350	8,0	5,0	24,6	24,37
5	315	8,0	4,0	23,4	22,83
6	315	8,0	6,0	23,4	27,65
7	280	4,0	5,0	24,8	28,00
<b>8 *</b>	<b>315</b>	<b>6,0</b>	<b>5,0</b>	<b>24,5</b>	<b>27,08</b>
9	280	6,0	4,0	23,2	24,51
10	280	8,0	5,0	22,6	22,97
11	280	6,0	6,0	23,5	27,65
12	350	6,0	6,0	24,8	29,64
13	315	4,0	4,0	25,8	28,03
<b>14 *</b>	<b>315</b>	<b>6,0</b>	<b>5,0</b>	<b>23</b>	<b>27,22</b>
15	350	4,0	5,0	26,8	28,96

Observação: valores com (\*) são os níveis médios dos fatores ou pontos centrais

Em que:

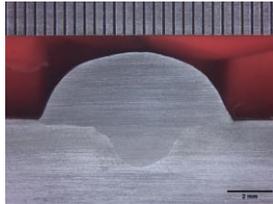
$I_p$  = corrente de pico (A);

$T_b$  = tempo de base;

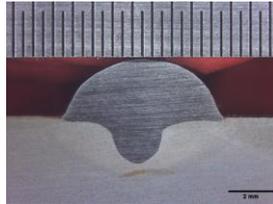
$V_s$  = velocidade de soldagem (mm/s);

$W$  = velocidade de alimentação do arame (m/min).

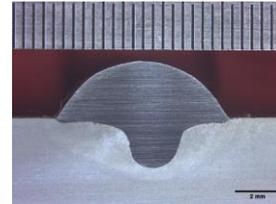
### C – Macrografias



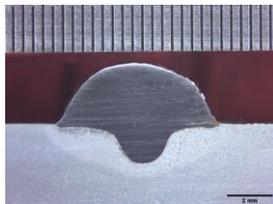
Cordão de solda 1



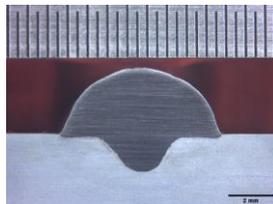
Cordão de solda 2



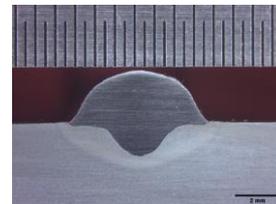
Cordão de solda 3



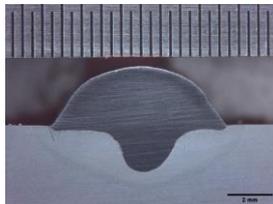
Cordão de solda 4



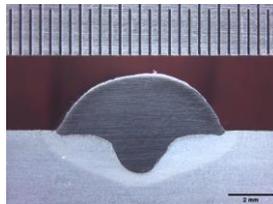
Cordão solda 5



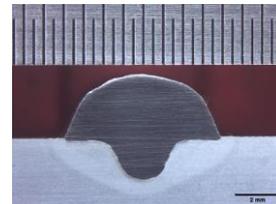
Cordão de solda 6



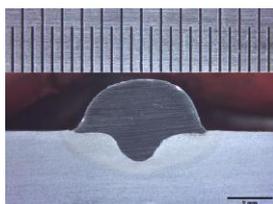
Cordão de solda 7



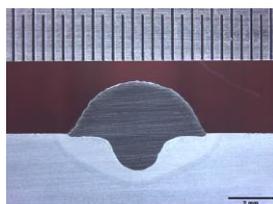
Cordão de solda 8



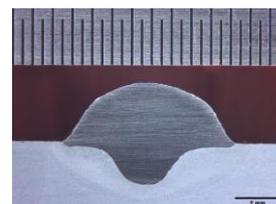
Cordão de solda 9



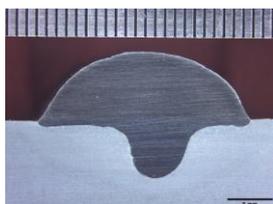
Cordão de solda 10



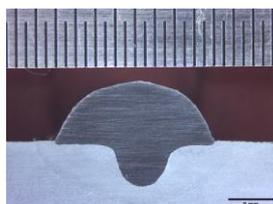
Cordão de solda 11



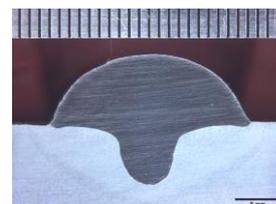
Cordão de solda 12



Cordão de solda 13



Cordão de solda 14



Cordão de solda 15

Figura C1 – Macrografias dos cordões de solda na ordem experimental