

## **Análise das superfícies de resposta da diluição e morfologia do cordão em processo de soldagem MIG-PV**

 <https://doi.org/10.56238/sevened2024.010-051>

### **Rafael Ellwanger Pimentel**

Doutorando em Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.  
E-mail: rafaellpimentel@hotmail.com

### **Arnaldo Ruben Gonzalez**

Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.  
E-mail: ruben@mecanica.ufrgs.br

### **Matheus Botega**

Mestrando em Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.  
E-mail: matheusbotega94@gmail.com

### **Leandro Rubén González**

Mestrando em Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.  
E-mail: leorubengonzalez@gmail.com

## **RESUMO**

A complexidade dos processos de soldagem atuais, bem como sua sensibilidade e precisão fazem com que seja necessário o emprego de métodos estatísticos e otimização, acompanhados da busca pelo erro experimental e do ajuste do modelo obtido, visando a diminuição de tempo e custo. Embora haja inúmeros tratamentos que surgiram com o passar do tempo, a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) se concretizou como uma das formas mais ajustadas de se gerir pesquisas relacionadas a esse escopo, ao combinar planejamento e análise de experimentos, modelagem e otimização. Além disso, a busca de processos que se ajustem às necessidades impostas no cenário vigente para com revestimento, faz com que se pesquisem novos processos de soldagem, que aliem baixa diluição, com valores de largura e altura de reforço maximizados, com apenas uma camada. Essa dificuldade, faz com que os processos de soldagem sejam conduzidos em conjunto com essas ferramentas, tornando o processo mais eficiente. Nesse sentido, com o objetivo de juntar as duas frentes expostas, o presente trabalho, por meio do emprego de Box-Behnken (BBD), buscou analisar a MSR da diluição, largura e altura de reforço, com o emprego de soldagem MIG-PV, com metal de adição AWS A5.9 ER385 (análogo ao AISI 904L) em posição (1G) sobre superfície livre (bead-on-plate) em substrato aço-carbono ASTM A36, com espessura de 6,35 mm, além de otimizar o processo via desejabilidade com altura de reforço. O resultado mostrou que os valores de entrada foram ajustados, visto os valores de R2 de 88%, bem como a morfologia das superfícies. Além disso, mostrou desejabilidade máxima na otimização, com erro experimental de 8,8 %, com valores de altura médios de 5,2 mm, tendo grande aplicação na indústria atual, com apenas uma camada.

**Palavras-chave:** Soldagem, Revestimento, BBD, MSR, Diluição, Otimização.

## 1 INTRODUÇÃO

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) abrange uma estrutura, ferramenta ou técnica, de grande aplicação e potencial para modelagem e otimização de processos industriais. Isso se comprova pela grande quantidade de trabalhos em diversas áreas do conhecimento, como engenharia (GHAEDI ET AL., 2015), área da saúde (AUGUSTIN ET AL., 2012), e manufatura (ROSHAN ET AL., 2013). Analisando em aplicações específicas de soldagem, o tema se torna um leque de possibilidades, uma vez que é possível encontrar inúmeros processos de soldagem que são analisados por meio da MSR (AHMADNIA ET AL., 2016; HASAN ET AL., 2017; JAHANZAIB ET AL., 2017; LOTFI E NOUROUZI, 2014; MOSTAAN ET AL., 2016; MOSTAFAPOUR ET AL., 2017; KORRA ET AL., 2015; RAMACHANDRAN ET AL., 2016; SAFEEN ET AL., 2016; SHI ET AL., 2014; WINICZENKO, 2016).

Entretanto, como os termos analisados podem carregar uma determinada complexidade, torna-se necessário o correto dimensionamento do experimento proposto, uma vez que a aplicação torna a região inicialmente analisada, delimitada (MYERS e MONTGOMERY, 2009), e que as variáveis de entrada acabam controlando as de saída (MONTGOMERY, 2017). Evidentemente, a relação dessas variáveis dentro do arranjo experimental é ditada por conceitos estatísticos advindos da matemática (LEITHOLD, 1994). Porém, a depender das variáveis envolvidas e suas quantidades em casos práticos do cotidiano, mesmo com esse respaldo numérico, ainda assim, as funções de interesse podem ser desconhecidas (BOX, 1954; STEWART, 2012).

O conhecimento do conjunto das variáveis que regem o experimento, acaba implicando nas buscas de procedimentos orientados para que se consiga avaliar o efeito dessa variação nas variáveis de saídas do estudo proposto (MONTGOMERY, 2017). Portanto, e atendendo a essa necessidade, foram desenvolvidas inúmeras técnicas para contornar essa problemática, que acabam formando o estudo do Planejamento e Análise de Experimento (DoE), e que se destaca os Composto Central (CCD), Box-Behnken (BBD), Taguchi. A escolha desses arranjos é decidida dependendo da necessidade de aplicação, podendo ser avaliado em diversas frentes, e ser utilizados individualmente (EKICI E MOTORCU, 2014; TEIMOURI ET AL., 2017), de forma combinada (PATEL ET AL., 2016) ou até mesmo comparativamente (SIVARAOS ET AL., 2014), buscando as vezes um melhor refino do processo.

O uso dessa ferramenta, não vem separada de sua correta interpretação. Além de devidas restrições de espaço, seja pelo arranjo inicial ou por uma realocação de pontos com o objetivo alvo de atingir a resposta esperada, a determinação da escolha das variáveis de entrada torna-se importante, e apresenta dois métodos praticados: o primeiro, mais tradicional, é empregado um arranjo fracionado com poucas corridas (BOX E HUNTER, 1961), e no outro, surge uma readequação de valores

semelhantes aos da literatura, em conjunto com uma bagagem de experiência prática do responsável (GOOS E JONES, 2011), podendo também haver projeto inicial exploratório.

Contudo, a análise e o entendimento da convexidade da superfície de resposta, da curvatura e a relação do sentido da otimização são fundamentais (HOERL, 1985) uma vez que uma superfície côncava apresenta ponto de mínimo, e convexa de máximo. Porém, algumas morfologias de resposta podem apresentar uma geometria em formato de sela, que dificulta, em vezes, a obtenção de pontos máximo, quem dera mínimos, e são comumente vistos em processos de manufatura (SENTHILKUMAR E KANNAN, 2015; VERMA ET AL., 2017).

A otimização acaba sendo uma variante da própria MSR, sendo um componente da metodologia. Ela pode ser entendida como um atributo necessário a ser objetivado conforme a natureza do problema (RAO, 2009; ZAVADSKAS E TURSKIS, 2010). Dependendo da morfologia da resposta, pode-se atribuir um direcionamento racional, buscando valores mínimos, máximos ou até mesmo valores alvo, para então caracterizar as novas variáveis de entrada (DEB ET AL., 2017; ŠAPARAUSKAS ET AL., 2011), encontrando assim, o equacionamento de resposta e erro experimental (BRIGHTMAN, 1978).

Na área de manufatura, é fácil encontrar trabalhos que maximizam os resultados, especialmente em ligas soldadas, por exemplo, o aumento da resistência à tração (KUMAR ET AL., 2017; SUDHAGAR ET AL., 2017). Já em outro processo, estudos em peças usinadas visando a redução da rugosidade das peças, buscando, evidentemente, valores de respostas mínimos (KANT E SANGWAN, 2014; ÖKTEM ET AL., 2005). O assunto não cessa, uma vez que inúmeros trabalhos podem ser analisados com objetivos de buscar a otimização de valores máximos e mínimos (ABUHABAYA ET AL., 2013; SONG ET AL., 2014).

Um método de otimização da superfície de resposta é o *desirability*, ou desejabilidade, proposto inicialmente por (DERRINGER E SUICH, 1980), que através dos valores de desejabilidade simples e composta, retorna os valores buscados como mínimo, máximo ou alvo, sempre observando a morfologia da resposta, a interação da otimização e seus valores de desejabilidade. Trabalhos em soldagem aplicam o método (AHMADNIA ET AL., 2016, PIMENTEL, 2023; PIMENTEL ET AL., 2023) como também é aplicado em outros processos (HOSSEINZADEH E MOUZIRAJI, 2016), mostrando sua importância.

Nos processos de soldagem, muitas vezes há necessidade do uso da ferramenta, devido às dificuldades dos parâmetros envolvidos. No estudo, é proposto a aplicação da análise da superfície de resposta das variáveis de entrada, e a relação com as variáveis de saída. Foram plotados os gráficos das respostas da diluição, variável importantes no processo de soldagem, principalmente em aplicações de revestimento (GOMES, 2010; PIMENTEL, 2023; PIMENTEL ET AL., 2023). Somado a isso,

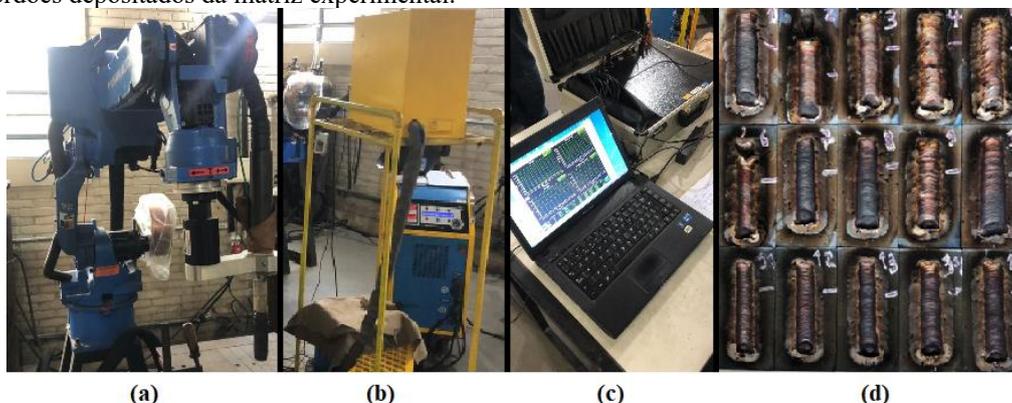
foram analisados a morfologia do cordão, como sua largura (L) e altura de reforço (H), que são parâmetros importantes para aplicação em soldagem (PIMENTEL ET AL., 2023).

Ademais, foi proposto a otimização do arranjo experimental via método de desejabilidade com valor de altura de reforço máximo, visto que impactam na morfologia do revestimento. Para tanto, foi utilizado o processo MIG/MAG-PV, que pela polaridade inversa consegue atingir a aplicação necessária para revestimento, uma vez que diminui a temperatura e controla melhor o processo (FARIAS ET AL., 2005; PUHL, 2011). O processo foi depositado como revestimento com adição de arame AWS A5.9 ER385 (análogo ao AISI 904L) sobre chapas de aço-carbono ASTM A36.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento de soldagem MIG-PV e análise foram realizados no Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (LS&TC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Os equipamentos empregados para soldagem e coleta de dados e a matriz experimental estão demonstrados na Figura 1. Para movimentação da tocha o braço robótico da Yaskawa (a), uma fonte de soldagem DIGIPlus A7 450 da IMC e dispositivo de alimentação do arame (b), um sistema de controle do processo e aquisição de dados portátil SAP V4.01 da IMC (c), e os quinze cordões depositados da matriz experimental (d).

Figura 1:(a) Braço robótico; (b) fonte de soldagem e sistema de alimentação do arame; (c) sistema de aquisição de dados; (d) quinze cordões depositados da matriz experimental.



O processo MIG/MAG – PV foi empregado com metal de adição AWS A5.9 ER385 (análogo ao AISI 904L) na posição (1G) sobre superfície livre (*bead-on-plate*) em substrato aço-carbono ASTM A36, de dimensões 150 x 50 x 6,35 mm. Além disso, o processo foi realizado com tecimento, onde estudos mostraram bons resultados (FRATARI ET AL., 2010; MIRANDA ET AL., 2015). Os níveis dos fatores de entrada podem ser vistos na Tabela 1, e foram usados no projeto de experimentos Box-Behnken (BBD), para três fatores requer apenas 12 execuções e mais três réplicas no ponto central, totalizando 15 execuções (BOX E BEHNKEN, 1960). Além da aplicação de BBD, foi empregado o método de superfície de resposta, que análogo à representação gráfica de um cubo para o BBD, resulta na representação gráfica da superfície do resultado que pode ser otimizado (BOX E DRAPER, 1987).

Tabela 1: Parâmetros de entrada e níveis do projeto de experimento aplicado.

Fatores	Níveis		
	Valor mínimo (-1)	Ponto Central (0)	Valor máximo (+1)
Amplitude (mm): $A_t$	6,0	7,0	8,0
Frequência Tecimento (Hz): $F_t$	0,6	0,9	1,2
Velocidade de soldagem (mm/s): $V_s$	1,5	2,0	2,5

Os parâmetros da curva de corrente da polaridade variável foram obtidos via testes prévios, mas também analisando e mudando os parâmetros de trabalhos passados, uma vez da não obtenção de bons resultados iniciais (KANNAN E YOGANANDH, 2010; MURUGAN E PARMAR, 1994; NASCIMENTO ET AL., 2009). Os valores podem ser vistos na Tabela 2, bem como outros valores mantidos constante durante todo o processo de soldagem, além do diâmetro do metal de adição de 1,2 mm, podem ser observados: ângulo de deslocamento da tocha (neutro) =  $0^\circ$ , distância bico de contato peça (DBCP) = 18 mm, vazão do gás de proteção (argônio) = 18 l/min.

Tabela 2: Parâmetros mantidos constantes da curva de corrente polaridade variável.

Parâmetros curva corrente	Valores constantes
$I_p$ - Corrente de pico positivo	350 A
$T_p$ - Tempo de pico positivo	3,0 ms
$I_b$ - Corrente de base	40 A
$T_b$ - Tempo de base	5,0 ms
$I_n$ - Corrente de pico negativa	-70 A
$T_n$ - Tempo de pico negativo	5,0 ms

O procedimento de soldagem realizado consistiu na deposição de um cordão em cada chapa, totalizando 15 experimentos mais duas chapas para validação de altura de reforço pelo método de otimização. Para o erro experimental, foi realizado a média simples de dois cordões. As seções transversais, após cortadas com máquina de (*cut-off*) padrão, disponível no laboratório, foram embutidas, lixadas e polidas. Após, foi utilizado o ataque com o reagente químico Nital 2% para revelação das macrografias.

Além do mais, as imagens foram obtidas via Lupa de aumento EZ4 HD da marca Leica e as tomadas de medidas foram realizadas utilizando o *software* livre ImageJ, com uma média simples de três verificações. Já o *software* utilizado para a análise do experimento e plotagem dos gráficos foi

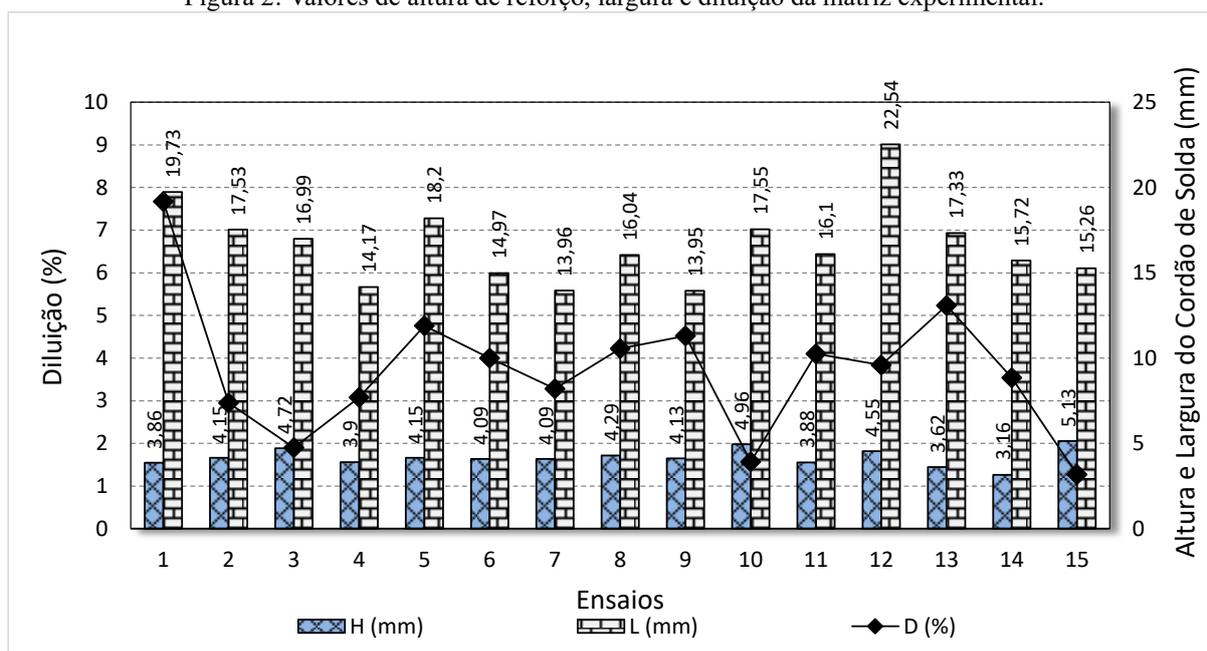
Minitab® e Statistica®, disponibilizado pela universidade. Foram gerados gráficos de superfície de resposta da diluição, bem como altura de reforço e largura.

Para avaliar os efeitos principais (linear e quadrático) e interações dos fatores sobre as respostas observadas, usou-se análise de variância (ANOVA). Para essa análise foi usado o nível de confiança ( $\alpha$ ) de 0,05, e para valores de alfa ( $\alpha$ ) menores que 5%, admitiu-se que a variável de controle em questão é significativa na 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. Entretanto, quanto menor for o valor de valor-p, maior será a influência do parâmetro na resposta analisada.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

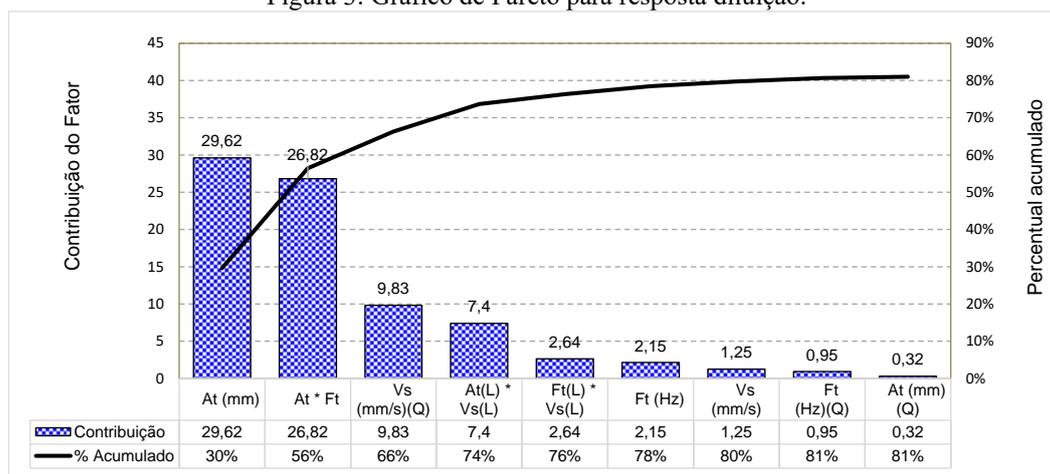
Os dados coletados da altura e largura do cordão de solda, os valores da diluição para cada tratamento da matriz de experimentos BBD pode ser observada na Figura 2. É possível notar valores baixos de diluição e largura que ultrapassam 22 mm, além de alturas de reforço mínima de 3,62 mm. O maior valor de diluição apresentado não ultrapassou 8%. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de todo e qualquer modelo deve ser estimado, para saber o ajuste experimental e estatístico do modelo obtido. Os valores de  $R^2$  das respostas analisadas foram: 81% (diluição), 83% (altura de reforço) e o maior de todos observado, de 88% para largura. Esses valores são considerados satisfatórios na análise do modelo matemático/estatística, uma vez que o valor mínimo é de 70% (MONTGOMERY, 2007). Isso mostra que, o controle da diluição, mesmo que considerado ajustado, teve o menor ajuste em relação a morfologia do cordão sendo também a única variável que envolve questões metalúrgicas.

Figura 2: Valores de altura de reforço, largura e diluição da matriz experimental.



Mediante a ANOVA foi possível determinar que os parâmetros principais  $A_t$  e  $F_t$  apresentam forte efeito significativo na diluição para um nível de significância  $\alpha = 0,05$  (Valor-p < 0,05). Com a Figura 3 nota-se que a amplitude de tecimento tem contribuição de 29,62%, enquanto sua interação linear com a frequência de tecimento apresenta contribuição de 26,82 %, mostrando que somados correspondem a mais de 50% de peso. O erro estatístico apresentou valor de 7,39%, o maior entre as variáveis de resposta analisadas.

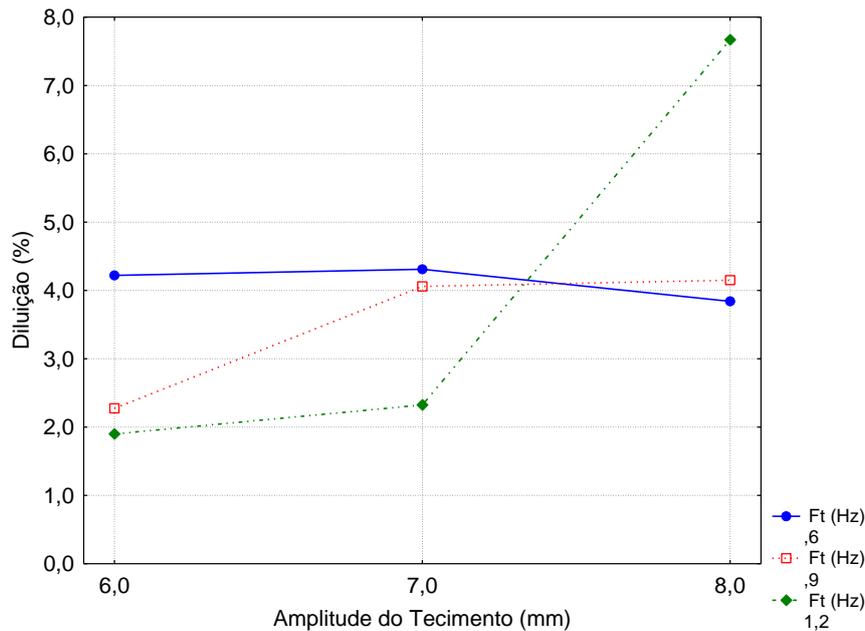
Figura 3: Gráfico de Pareto para resposta diluição.



Como a contribuição da amplitude e frequência de tecimento são relevantes, a Figura 4 apresenta o comportamento dessa interação em relação a diluição estudada. O comportamento da frequência e amplitude nos valores máximos mostrou um resultado não favorável para diluição, uma vez que apresentou valores elevados, superiores a 7%. Os valores de amplitude de tecimento no valor baixo, em 6 mm, apresentaram ótimos valores de diluição, independente da frequência de tecimento empregada.

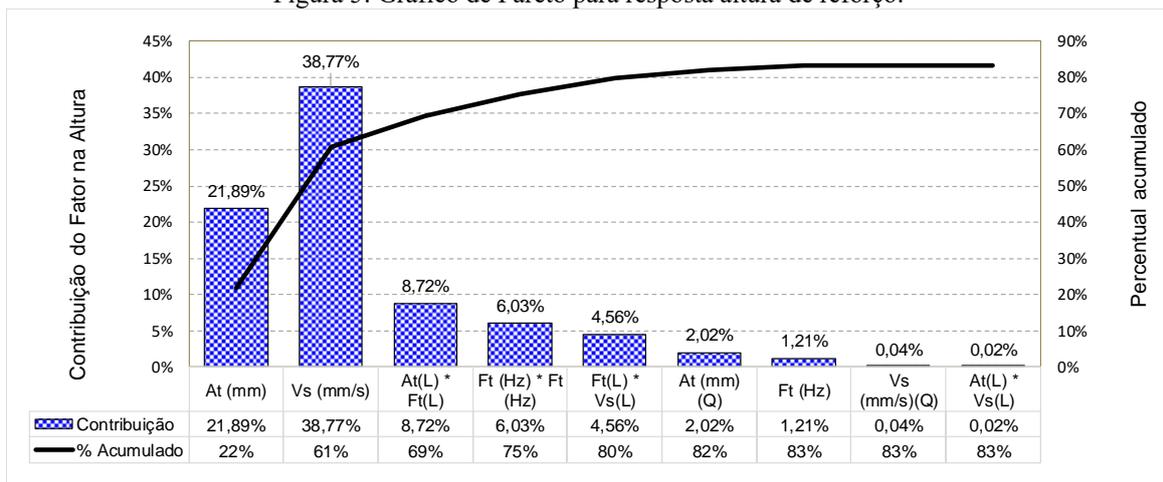
Ademais, a combinação ótima para valores mínimos de diluição no recorte analisado, aponta para valores mínimos de  $A_t$  e máximos  $F_t$ , mesmo que essa relação não seja diretamente testada na matriz experimental pela característica inerente do BBD. A amplitude de tecimento ser a variável de entrada mais influente vai de acordo com a resposta da diluição, uma vez que  $A_t$  aumenta, aumenta a largura e também o valor de diluição (PIMENTEL, 2023).

Figura 4: Interação  $F_t$  versus  $A_t$  para diluição.



A Figura 5 apresenta o gráfico de Pareto para resposta altura de reforço. Mediante análise embasada na ANOVA é possível notar os parâmetros principais de contribuição, nos quais mostraram contribuição de 38,77 % para  $V_s$  e 21,89 % para  $A_t$ , ambos somando 61%. O erro para a resposta altura de reforço apresentou valor de 4,68%. Pode-se notar que diferente da diluição, o linear de contribuição significativa é visto em dois parâmetros de entrada, inclusive com uma elevada contribuição da velocidade de soldagem sendo mais destacada.

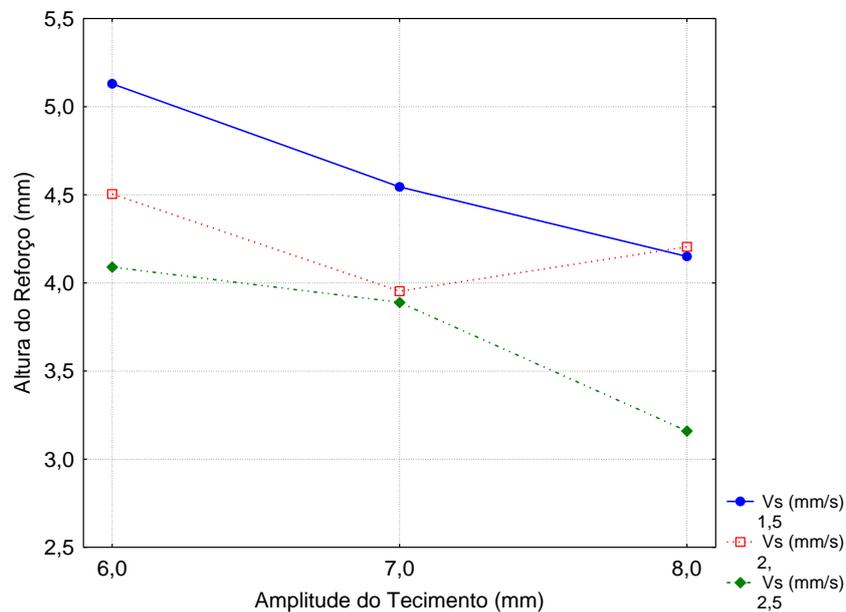
Figura 5: Gráfico de Pareto para resposta altura de reforço.



Com os parâmetros significativos visto a ANOVA, com a Figura 6 é possível entender o comportamento das variáveis de maior contribuição. É possível notar que à medida que a amplitude de tecimento aumenta, a altura de reforço diminui, para todos os níveis de  $V_s$ . Os valores de velocidade

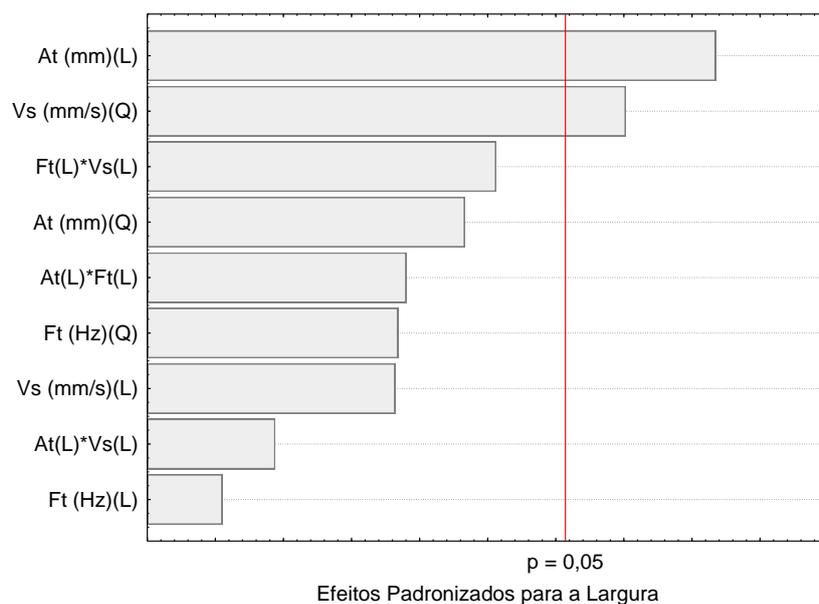
de soldagem no nível baixo, apresenta maiores valores de altura de reforço, com resposta maior que 5 mm de altura de reforço para níveis baixos de  $A_t$  e  $V_s$ .

Figura 6: Interação  $A_t$  versus  $V_s$  para altura de reforço.

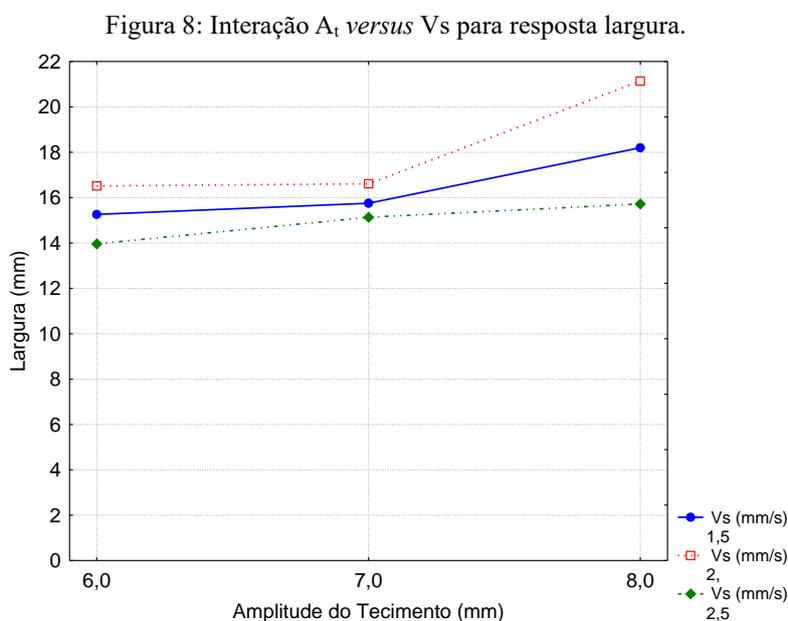


Mediante a ANOVA foi determinado os parâmetros principais significativos para um nível de significância  $\alpha = 0,05$  (Valor-p < 0,05). Por meio do gráfico de Pareto, na Figura 7, é possível observar que  $A_t(L)$  e  $V_s(Q)$  são significativos, com contribuição de 32,08 % para o primeiro e 21,58 % para o segundo. Além de apresentar um erro de 5,36 % para largura, ambos os fatores contribuem com mais de 50%, mostrando o impacto dos parâmetros.

Figura 7: Gráfico de Pareto e de efeitos principais para largura.



É possível notar o comportamento das variáveis significativas na Figura 8, onde nenhuma curva se cruza, mostrando um comportamento crescente para todo  $V_s$ , à medida que o valor de  $A_t$  vai do nível baixo para o alto. É possível alcançar valores maiores do que 20 mm de largura, com a combinação de  $A_t (+1)$  e  $V_s (0)$ . Quando se busca valores mínimos de largura, deve-se entrar com valores de  $A_t (-1)$  e  $V_s (+1)$ , alcançando valor de 14 mm.

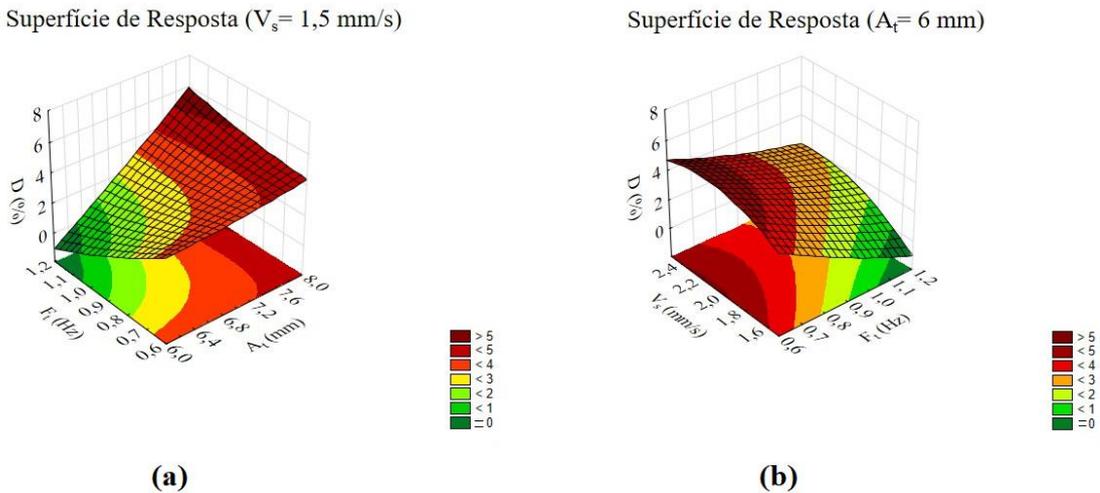


A Figura 9 (a) apresenta a resposta com valor de  $V_s (-1)$ , pois apresentou a menor resposta de diluição, sendo benéfico para revestimento (GOMES, 2010; PIMENTEL, 2023), bem como a relação de  $A_t * F_t$  se mostrou influente, visto o gráfico de Pareto na Figura 3. Pode ser visto que, mesmo que os valores de resposta não apresentam uma morfologia côncava, convexa ou sela (BEZERRA ET AL., 2008; BOX E DRAPER, 2007; EDWARDS, 2007; OLIVEIRA, 2018), pode se observar uma morfologia semelhante à convexa, sendo elegível o ponto mínimo.

A morfologia mostra que o arranjo experimental proposto apresentou possibilidade de se obter valores mínimos, mesmo não sendo uma superfície bem caracterizada de formato convexo. Com valores  $A_t (-1)$  e  $F_t (+1)$  é possível obter valores mínimos de diluição, muito menores que aqueles referenciados (MURUGAN E PARMAR, 1997). Mesmo que os valores flutuem em qualquer eixo, ainda a diluição apresenta valores baixos, aplicáveis a revestimento.

A Figura 9 (b) apresenta a superfície de resposta de  $F_t * V_s$ , que é significativo visto a Figura 3, com valor  $A_t (-1)$ , visto sua resposta individual apresentar menor valor de diluição. Pode-se notar que o valor mínimo de diluição é obtido com valores  $F_t (+1)$  e  $V_s (-1)$ , em um formato propício para apresentar um ponto mínimo, dentro de um arranjo bem estabelecido sem extrapolação, mas diferente de um ponto convexo. Além disso, em ambos gráficos da Figura 9, pode-se notar alvos de valores alcançáveis com diluição zero, tanto em (a) como em (b).

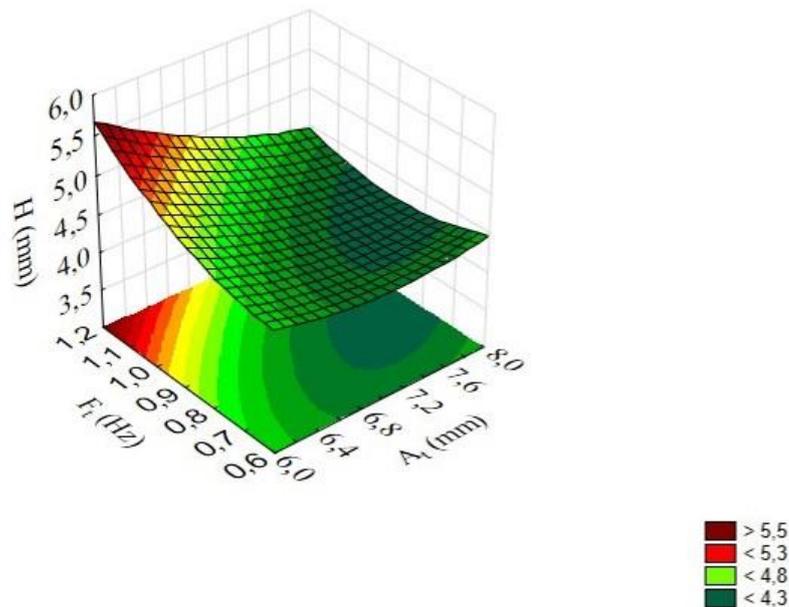
Figura 9: (a) MSR  $F_t$  versus  $A_t$  com  $V_s=1,5$  mm/s, para diluição; (b) MSR  $V_s$  versus  $F_t$  com  $A_t=6$  mm, para diluição.



Visto os valores influentes no gráfico de Pareto na Figura 5, a Figura 10 apresenta a relação de  $A_t * F_t$  com  $V_s$  (-1), pois apresenta a maior resposta de altura de reforço, benéfica para revestimento (PIMENTEL, 2023). Com ela pode-se notar que com o formato da MSR agora se consegue um ponto máximo bem definido, mesmo que não seja uma superfície convexa, chegando a valores superiores a 5,5 mm de altura de reforço com  $A_t$  (-1) e  $F_t$  (+1). Mesmo nos valores menores de altura de reforço, apresentou um valor satisfatório, atendendo projetos de revestimento (MOTA ET AL., 2016).

Figura 10: MSR  $F_t$  versus  $A_t$  com  $V_s=1,5$  mm/s, para altura de reforço.

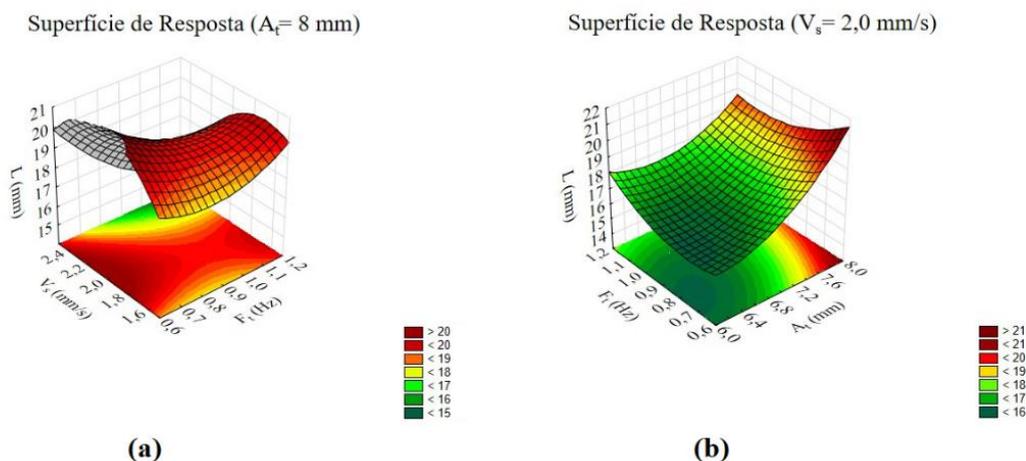
Superfície de Resposta ( $V_s=1,5$  mm/s)



Por meio dos valores influentes no gráfico de Pareto da Figura 7, a Figura 11 (a) apresenta  $A_t$  (+1), pois retorna o maior valor de largura, tendo como resposta uma superfície de sela, que normalmente para otimização de ponto máximo apresenta múltiplos resultados, como a maioria dos

trabalhos (OLIVEIRA, 2018). Entretanto, os valores de ponto mínimos ficam praticamente inviáveis, visto sua morfologia. Ainda assim os valores de largura apresentam uma grande região de cobertura com valores maiores que 20 mm, principalmente na parte central da resposta.

Figura 11: (a) MSR  $V_s$  versus  $F_t$  com  $A_t = 8$  mm, para largura do cordão; (b) MSR  $F_t$  versus  $A_t$  com  $V_s = 2,0$  mm/s, para largura do cordão.

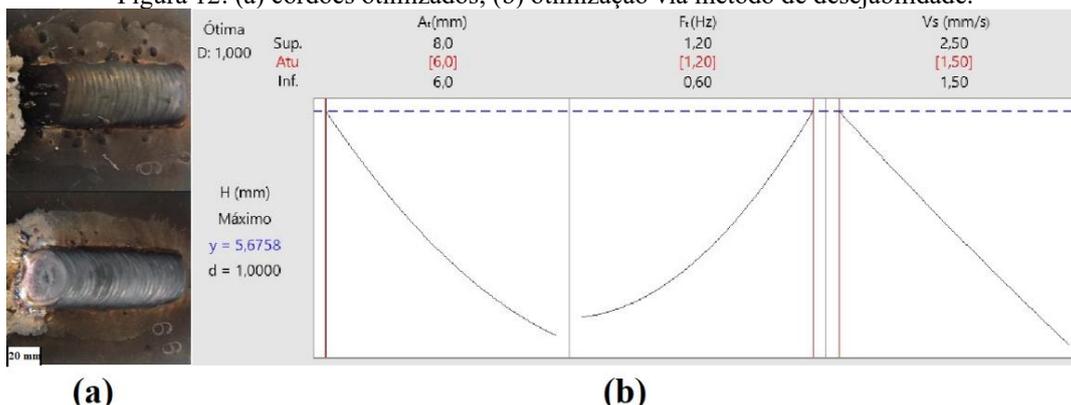


Entretanto, na Figura 11 (b), com  $V_s$  (0), apresenta a maior largura, como visto na Figura 7. Mesmo não apresentando uma superfície côncava, é possível observar uma região de ponto máximo, com valores de  $A_t$  (+1) e  $F_t$  (-1), chegando a valores maiores a 21 mm, superiores a revestimento com outros processos de soldagem que usaram tecimento (PIMENTEL, 2023). Mesmo com os valores mínimos de resposta, na região verde, ainda assim é possíveis valores elevados de largura, muito pelo emprego do tecimento.

Como a otimização depende de multirresposta, isto é, as variáveis de entrada devem ser redimensionadas, ainda dentro do arranjo experimental, uma vez que os valores retornados encontrados atendem o projeto. Assim, o uso de otimização é comum para que se alcance um objetivo pontual, ou uma série deles (PAIVA ET AL., 2007). A Figura 12 (b) mostra a otimização com o método proposto por (DERRINGER E SUICH, 1980), onde apresentou tanto desejabilidade simples como compostas máximos, mostrando um alcance provável.

Ainda na Figura 12 (b) é possível notar que os valores da multirresposta otimizada, onde apresentam resposta de: amplitude de tecimento 6,0 mm, frequência de tecimento 1,20 Hz e velocidade de soldagem 1,50 mm/s. Isso demonstra que os valores de otimização estão nos extremos mínimos do arranjo experimental para  $A_t$  e  $V_s$ , e máximo para  $F_t$ . O valor de altura máxima de reforço apresentou valor de 5,67 mm, o que demonstra um cordão elegível a aplicação de revestimento, sem uso de sobreposição vertical (SILVA ET AL., 2014).

Figura 12: (a) cordões otimizados; (b) otimização via método de desejabilidade.



A Figura 12 (a) mostra a morfologia dos dois cordões otimizados para obtenção do erro experimental, mediante o valor de altura de reforço. Além de apresentar uma boa continuidade, sem a presença de poros, é possível ver uma boa repetitividade. O erro da otimização mostrou valor de 8,8 %, menor ainda que em revestimento, com outro processo, mas com o mesmo par de materiais, com emprego de BBD e otimização via desejabilidade (PIMENTEL, 2023; PIMENTEL ET AL., 2023).

#### 4 CONCLUSÕES

Com o presente trabalho, foi possível concluir:

- O processo MIG-PV mostrou boa continuidade geométrica, morfologia do cordão adequada, bem como baixas diluições que o creditam a aplicação em revestimento.
- Os valores de  $R^2$  mostraram ótimo ajuste, apresentando menor valor de 81% para diluição e máximo de 88% para largura.
- Via ANOVA para diluição,  $A_t$  se mostrou mais significativo com valor de 29,62% e erro de 7,39% para a resposta.
- Via ANOVA para altura de reforço,  $V_s$  se mostrou mais significativo com valor de 38,77% e erro de 4,68% para a resposta.
- Via ANOVA para largura,  $A_t$  se mostrou mais significativo com valor de 32,08% e erro de 5,36 % para a resposta.
- A otimização via método de desejabilidade proposto com valor máximo, teve retorno (y) de 5,67 mm. O sistema realimentou a entrada visando a otimização com valores  $A_t$  (-1) e  $V_s$  (-1) e  $F_t$  (+1).
- O erro experimental via desejabilidade proposto mostrou valor médio de 8,8 %.



## REFERÊNCIAS

- ABUHABAYA, A., FIELDHOUSE, J., E BROWN, D. The optimization of biodiesel production by using response surface methodology and its effect on compression ignition engine. *Fuel processing technology*, v. 113, p. 57-62, 2013.
- AHMADNIA, M., SHAHRAKI, S., E KAMARPOSHTI, M. A. Experimental studies on optimized mechanical properties while dissimilar joining AA6061 and AA5010 in a friction stir welding process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 87, n. 5-8, p. 2337–2352, 2016.
- AUGUSTIN, G., DAVILA, S., UDILLJAK, T., STAROVESKI, T., BREZAK, D., E BABIC, S. Temperature changes during cortical bone drilling with a newly designed step drill and an internally cooled drill. *International Orthopaedics*, v. 36, n. 7, p. 1449-1456, 2012.
- BEZERRA, M. A., SANTELLI, R. E., OLIVEIRA, E. P., VILLAR, L.S., E ESCALEIRA, L.A. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, n. 76, p. 965-977, 2008.
- BOX, G. E. P., E HUNTER, J. S. The 2k-p Fractional Factorial Designs Part. *Technometrics*, v. 3, n. 3, p. 311-351, 1961.
- BOX, G. E. P. Exploration and Exploitation of Response Surfaces: Some General Considerations and Examples. *Biometrics*, v. 10, n. 1, p. 16-60, 1954.
- BOX G. E. P, E BEHNKEN D. W. Some new three level designs for the study of quantitative variables. *Technometrics*.2(4):455-475, 1960.
- BOX, G. E. P, E DRAPER, N. R. Empirical model building and response surfaces. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1987.
- BOX, G. E. P., E DRAPER, N.R. Response surfaces, mixtures, and ridge analyses. 2 ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.
- BRIGHTMAN, H.J. Optimization through experimentation: applying Response Surface Methodology. *Decision Sciences*, v. 9, n. 3, p. 481-495, 1978.
- DEB, K., SINDHYA, K., E HAKANEN, J. Multi-Objective Optimization. In: SENGUPTA, Raghu Nandan; GUPTA, Aparna; DUTTA, Joydeep. *Decision Sciences: Theory and Practice*. Boca Raton: Taylor and Francis, pp.146-179, 2017.
- DERRINGER, G., E SUICH, R. Simultaneous Optimization of Several Response Variables, *Journal of Quality Technology*, 12:4, 214-219, 1980.
- EDWARDS, J. R. Polynomial regression and response surface methodology. In: OSTROFF, C.; JUDGE, T. A. *Perspectives on organizational fit*. San Francisco: Jossey-Bass, pp. 361-372, 2007.
- EKICI, E., E MOTORCU, A. R. Evaluation of drilling Al/SiC composites with cryogenically treated HSS drills. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 74, n. 9, p. 1495-1505, 2014.
- FARIAS, J.P., MIRANDA, H.C., MOTTA, M.F., PAIVA, F.D.Q., E PESSOA, E.F. Efeito da Soldagem MIG/MAG em Corrente Alternada sobre a Geometria da Solda. *Soldagem & Inspeção*, v. 10, nº 4, p. 173-181, 2005.



FRATARI, R. Q, SCHVARTZMAN, M. A. M., E SCOTTI, A. Otimização dos parâmetros de tecimento para confecção de amanteigamento em chapas de aço ao carbono pelo processo TIG com arame AWS ER309L. Soldagem & Inspeção, 2010.

GHAEDI, M., HAJJATI, S., MAHMUDI, Z., TYAGI, I., AGARWAL, S., MAITY, A., E GUPTA, V.K. Modeling of competitive ultrasonic assisted removal of the dyes - Methylene blue and Safranin-O using Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. Chemical Engineering Journal, v. 268, p. 28-37, 2015.

GOMES, J. H.F. Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço ABNT 1020 com utilização de arame tubular inoxidável austenítico. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

GOOS, P., E JONES, B. Optimal Design of Experiments: a case study approach. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

HASAN, M. M., ISHAK, M., E REJAB, M.R.M. Influence of machine variables and tool profile on the tensile strength of dissimilar AA7075-AA6061 friction stir welds. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 90, n. 9-12, p. 2605– 2615, 2017.

HOSSEINZADEH, M., E MOUZIRAJI, M. G. An analysis of tube drawing process used to produce squared sections from round tubes through FE simulation and response surface methodology. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 87, n. 5-8, p. 2179–2194, 2016.

JAHANZAIB, M., HUSSAIN, S., WASIM, A., AZIZ, H., MIRZA, A., E ULLAH, S. Modeling of weld bead geometry on HSLA steel using response surface methodology. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 89, n. 5- 8, p. 2087–2098, 2017.

KANNAN, T., E YOGANANDH, J. Effect of process parameters on clad bead geometry and its shape relationships of stainless steel claddings deposited by GMAW. Int J Adv Manuf Technol. 47:1083–1095, 2010.

KANT, G., E SANGWAN, K. S. Prediction and optimization of machining parameters for minimizing power consumption and surface roughness in machining. Journal of Cleaner Production, v. 83, p. 151-164, 2014.

KORRA, N. N., VASUDEVAN, M. E BALASUBRAMANIAN, K. R. Multi-objective optimization of activated tungsten inert gas welding of duplex stainless steel using response surface methodology. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 77, n. 1-4, p. 67–81, 2015.

KUMAR, N., MUKHERJEE, M., E BANDYOPADHYAY, A. Comparative study of pulsed Nd:YAG laser welding of AISI 304 and AISI 316 stainless steels. Optics & Laser Technology, v. 88, p. 24-39, 2017.

HOERL, Roger W. Ridge Analysis 25 Years Later. The American Statistician, v. 39, n. 3, p. 186-192, 1985.

LEITHOLD, L. O cálculo com geometria analítica. 3 ed. São Paulo: HARBRA, 1994.

LOTFI, A. H., E NOUROUZI, S. Predictions of the optimized friction stir welding process parameters for joining AA7075-T6 aluminum alloy using preheating system. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 73, n. 9-12, p. 1717–1737, 2014.



MIRANDA, E. C., SILVA, C. C., MOTTA, M. F., MIRANDA, H. C., E FARIAS, J. P. Avaliação do Uso do Tecimento sobre o Nível de Diluição e Geometria do Cordão de Solda na Soldagem TIG com Alimentação Automática de Arame Frio. *Soldagem & Inspeção*. 180-190, 2015.

MONTGOMERY, D. C. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. John Wiley & Sons, Hoboken, 4th ed., 2007.

MONTGOMERY D.C. *Designs and Analysis of Experiments*. 9 ed. USA: John Wiley & Sons, 2017.

MOSTAAN, H., SHAMANIAN, M., SAFARI, M. Process analysis and optimization for fracture stress of electron beam welded ultra-thin FeCo-V foils. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 87, n. 1-4, p. 1045–1056, 2016.

MOSTAFAPOUR, A., EBRAHIMPOUR, A., E SAEID, T. Finite element investigation on the effect of FSSW parameters on the size of welding subdivided zones in TRIP steels. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 88, n. 1-4, p. 277–289, 2017.

MOTA, C.A.M., NASCIMENTO, A.S., GARCIA, D.V., SILVA, F.R.T., E FERRARESI V.A. Revestimento de Níquel Depositado pela Soldagem MIG e MIG com Arame Frio. *Soldagem & Inspeção*. 21(4):483-496, 2016.

MURUGAN, N., E PARMAR, R.S. Effects of MIG process parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 41 381-398, 1994.

MURUGAN, N., E PARMAR, R. S. Stainless steel cladding deposited by automatic gas metal arc welding. *Welding Journal*, v. 76, p. 391s-403s, 1997.

MYERS, R. H., E MONTGOMERY, D. C. *Response Surface Methodology: process and product optimization using designed experiments*. 3 ed. Nova York: John Wiley & Sons, 2009.

NASCIMENTO, A.S., FERNANDES, D.B., MOTA, C.A.M, E VILARINHO, L.O. Methodology for determination of parameters for welding MIG with variable polarity. *Welding International*. Pages 473-480, 2009.

ÖKTEM, H., ERZURUMLU, T., E KURTARAN, H. Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 170, n. 1-2, p. 11-16, 2005.

OLIVEIRA, L. G. de. *Fundamentos da Metodologia de Superfície de Resposta e suas aplicações em Manufatura Avançada: Uma análise crítica*. 2018. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.

PAIVA, A. P., FERREIRA, J.R, E BALESTRASSI, P.P. A multivariate hybrid approach applied to AISI 52100 hardened steel turning optimization. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 189, p. 26-35, 2007.

PATEL, M. G. C., KRISHNA, P., E PARAPPAGOUDAR, M. B. An intelligent system for squeeze casting process – soft computing based approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 86, n. 9, p. 3051-3065, 2016.

PIMENTEL, R.E. Revestimento de AWS A5.9 ER385 (AISI 904L) pelo processo TIG-P arame frio em ASTM A36. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2023.

PIMENTEL, R.E., GONZALEZ, A.R., BOTEAGA, M., E MARCOLIN, V.C. Aplicação de BBD em revestimento por soldagem TIG-P com tecimento. RevistaFT. Edição 125, Vol. 27, Pag. 9-10, 2023.

PUHL, E.B. Desenvolvimento de tecnologias no processo MIG/MAG para aumento de produtividade e melhoria da qualidade mediante o uso da polaridade negativa. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

RAMACHANDRAN, K. K., MURUGAN, N., E KUMAR, S. Shashi. Performance analysis of dissimilar friction stir welded aluminium alloy AA5052 and HSLA steel butt joints using response surface method. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 86, n. 9-12, p. 2373–2392, 2016.

RAO, S. S. Engineering optimization: theory and practice. 4 ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

ROSHAN, Babajanzade S., JOOIBARI, Behboodi M., TEIMOURI, R., ASGHARZADEH-AHMADI, G., FALAHATI-NAGHIBI, M., E SOHRABPOOR, H. Optimization of friction stir welding process of AA7075 aluminum alloy to achieve desirable mechanical properties using ANFIS models and simulated annealing algorithm. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 69, n. 5-8, p. 1803-1818, 2013.

SAFEEN W., HUSSAIN S., WASIM A., JAHANZAIB M., AZIZ H., E ABDALLA H. Predicting the tensile strength, impact toughness, and hardness of friction stir-welded AA6061- T6 using response surface methodology. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 87, p. 1765-81, 2016.

ŠAPARAUSKAS, J., ZAVADSKAS, E. K., E TURSKIS, Z. Selection of facade's alternatives of commercial and public buildings based on multiple criteria. International Journal of Strategic Property Management, v. 15, n. 2, p. 189–203, 2011.

SENTHILKUMAR B., E KANNAN T. Effect of flux cored arc welding process parameters on bead geometry in super duplex stainless steel claddings. Measurement, v. 62, p. 127-36, 2015.

SHI, H., ZHANG, K., XU, Z., HUANG, T., FAN, L., E BAO, W. Applying statistical models optimize the process of multi-pass narrow-gap laser welding with filler wire. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 75, n. 1-4, p 279–291, 2014.

SILVA, C. C., AFONSO, C. R. M., RAMIREZ, A. J., MOTTA, M. F., MIRANDA, H. F., E FARIAS J. P. Evaluation of the Corrosion Resistant Weld Cladding Deposited by the TIG Cold Wire Feed Process. Mat. Science For. P. 2822-2827, 2014.

SIVARAOS, MILKEYA, K.R., SAMSUDINA, A.R., DUBEYB, A.K., E KIDDC, P. Comparison between Taguchi Method and Response Surface Methodology (RSM) in Modelling CO2 Laser Machining. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, v. 8, n. 1, p. 35-42, 2014.

SONG, X., ZHANG, M., PEI, Z.J., E WANG, D. Ultrasonic vibration-assisted pelleting of wheat straw: A predictive model for energy consumption using response surface methodology. Ultrasonics, v. 54, n. 1, p. 305 -311, 2014.

STEWART, J. Calculus. 7 ed. Belmont: Cengage, 2012.



SUDHAGAR, S., SAKTHIVEL, M., MATHEW, PRINCE J., E DANIEL, S. A. A. A multi criteria decision making approach for process improvement in friction stir welding of aluminium alloy. *Measurement*, v. 108, p. 1-8, 2017.

TEIMOURI, R. AMINI, S., E MOHAGHEGHIAN, N. Experimental study and empirical analysis on effect of ultrasonicvibration during rotary turning of aluminum 7075 aerospace alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 26, p. 1-17, 2017.

VERMA G.C., KALAP., E PANDEY P.M. Experimental investigations into internal magnetic abrasive finishing of pipes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 88, p. 1657-68, 2017.

ZAVADSKAS, E. K., E TURSKIS, Z. A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making. *Technological and Economic Development of Economy*, v. 16, n. 2, p. 159-172, 2010.

WINICZENKO, R. Effect of friction welding parameters on the tensile strength and microstructural properties of dissimilar AISI 1020-ASTM A536 joints. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 84, n. 5-8, p. 1657–1668, 2016.