

Avaliação da Soldagem MIG/MAG com Transferência Metálica por Curto-Circuito Utilizando Ferramentas Computacionais e Modelagem Estatística

Weslei Rodrigues Niz¹ , José Elmo de Menezes^{1,2} , Daniel Souza³ , Demostenes Ferreira Filho³ , Clóves Gonçalves Rodrigues² 

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Programa de Especialização em Matemática, Goiânia, GO, Brasil.

² Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Escola Politécnica e de Artes, Goiânia, GO, Brasil.

³ Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Goiânia, GO, Brasil.

Como citar: Niz WR, Menezes JE, Souza D, Ferreira Filho D, Rodrigues CG. Avaliação da soldagem MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito utilizando ferramentas computacionais e modelagem estatística. Rev. Soldag. Insp. 2025;30:e3008. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI30.08>

Resumo: Neste trabalho foram analisados dados dos experimentos em soldagem MIG/MAG, realizados no modo de operação por curto-circuito, utilizando três gases: 100% argônio, argônio mais 25% de dióxido de carbono e 100% dióxido de carbono, possibilitando análises abrangentes dos parâmetros: tempo de curto-circuito; tempo de arco aberto; tensão de curto-circuito; tensão de arco aberto; taxa de subida da corrente; número de curtos e tensão de referência. Foram realizados testes de correlação (Pearson, Spearman, Kendall) para analisar a qualidade dos modelos, incluindo a aplicação de testes de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade dos resíduos sendo possível criar uma matriz de correlações com os parâmetros e gases testados. A correlação entre o tempo de arco aberto e o número de curtos, e para o tempo de arco aberto e a taxa de subida da corrente apresentaram forte correlação para todos os gases. As correlações entre a taxa de subida da corrente e o número de curtos, o tempo de curto e a tensão de curto-circuito, assim como a correlação entre a tensão de curto-circuito e a tensão de referência, demonstraram menor significância para todos os gases. Em relação à análise por série temporal, os modelos ARIMA e ETS foram ajustados e avaliados com métricas específicas, indicando a necessidade de melhorias no modelo para aumentar a precisão das previsões.

Palavras-chave: Testes de correlação; Matriz de correlações; Série temporal.

Evaluation of MIG/MAG Welding with Short-Circuit Metal Transfer Using Computational Tools and Statistical Modeling

Abstract: This work analyzed data from MIG/MAG welding experiments performed in short-circuit operation mode using three gases: 100% argon, argon plus 25% carbon dioxide and 100% carbon dioxide, enabling comprehensive analyses of the following parameters: short-circuit time; open arc time; short-circuit voltage; open arc voltage; current rise rate; number of shorts and reference voltage. Correlation tests (Pearson, Spearman, Kendall) were performed to analyze the quality of the models, including the application of Shapiro-Wilk tests to verify the normality of the residues, making it possible to create a correlation matrix with the parameters and gases tested. The correlation between the open arc time and the number of shorts, and between the open arc time and the current rise rate showed strong correlation for all gases. The correlations between the current rise rate and the number of shorts, the short-circuit time and the short-circuit voltage, as well as the correlation between the short-circuit voltage and the reference voltage, demonstrated lower significance for all gases. Regarding the time series analysis, the ARIMA and ETS models were adjusted and evaluated with specific metrics, indicating the need for improvements in the model to increase the accuracy of the predictions.

Key-words: Correlation tests; Correlation matrix; Time series.

1. Introdução

O processo de soldagem MIG/MAG é amplamente adotado na indústria devido à sua versatilidade, sendo utilizado tanto na fabricação de pequenas peças como na montagem de grandes estruturas. Nesse método um gás é empregado para proteger a zona de solda contra os gases da atmosfera. O eletrodo consiste em um arame contínuo que é alimentado de maneira constante.

Recebido: 03 Dez., 2024. Aceito: 03 Jun., 2025.

Editor: Cleiton Carvalho Silva (editor associado).

E-mails: wesleiriz@gmail.com (WRN), jelmo@pucgoias.edu.br (JEM), daniel.souza@ufg.br (DS), demostenesferreira@ufg.br (DFF), cloves@pucgoias.edu.br (CGR)



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Dentre os diferentes modos de operação destaca-se o de “curto-circuito”, onde uma gota de metal fundido forma-se na extremidade do arame, entra em contato com a poça de fusão, provocando um rápido aumento na corrente elétrica e, posteriormente, a ruptura do arame, o que resulta na transferência do metal fundido para a poça de fusão. Esse método é particularmente adequado para a soldagem de chapas finas e em posições desafiadoras, como a sobre-cabeça.

A regularidade na transferência de metal fundido da ponta do arame eletrodo para a poça de fusão é crucial para a qualidade da solda. Uma transferência irregular pode resultar em defeitos na soldagem, como porosidade, falta de fusão, trincas e inclusões de escória, comprometendo a integridade da peça soldada [1,2]. Uma transferência irregular está frequentemente associada a respingos excessivos, que podem afetar negativamente a qualidade da solda, a segurança do operador e a produtividade. A regularidade na transferência ajuda a minimizar a formação de respingos [2,3].

Um planejamento experimental bem executado ajuda a identificar a relação entre as variáveis de interesse, avaliar a influência de fatores-chave e otimizar as condições de um processo [4]. Algumas aplicações típicas do planejamento de experimentos são a seleção de parâmetros de projeto, controle de qualidade e pesquisa acadêmica [5].

Assim, nesse trabalho são avaliados os fatores que afetam a regularidade da soldagem MIG/MAG no modo curto-circuito utilizando rotinas computacionais e testes estatísticos programados e implementados em linguagem R. Foram analisados dados dos experimentos em soldagem MIG/MAG, realizados no modo de operação por curto-circuito, utilizando três gases: 100% argônio, argônio mais 25% de dióxido de carbono e 100% dióxido de carbono, possibilitando análises abrangentes dos parâmetros: tempo de curto-circuito; tempo de arco aberto; tensão de curto-circuito; tensão de arco aberto; taxa de subida da corrente; número de curtos e tensão de referência. Foram realizados testes de correlação (Pearson, Spearman, Kendall) para analisar a qualidade dos modelos, incluindo a aplicação de testes de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade dos resíduos, sendo possível criar uma matriz de correlações com os parâmetros e gases testados.

O texto está assim organizado. Na Seção 2 são introduzidos os conceitos básicos sobre a soldagem MIG/MAG por curto-circuito. São explicados os conceitos de indutância, regularidade de transferência e gases de proteção. São mostrados os principais parâmetros operacionais da soldagem operada no modo curto-circuito bem como alguns tipos de gases de proteção utilizados. É explicado o efeito da indutância e da tensão na soldagem, bem como a métrica utilizada para determinar a estabilidade do processo MIG/MAG por curto-circuito. Na Seção 3 apresentam-se alguns métodos estatísticos que desempenham papel crucial na compreensão das relações entre diferentes conjuntos de dados e na determinação das associações existentes entre variáveis. São introduzidas a correlação de Pearson, Spearman, e Kendall, e a ANOVA (análise de variância), e também as séries temporais. A Seção 4 se destina aos materiais e métodos empregados na pesquisa e na Seção 5 são apresentados os resultados e as análises dos dados obtidos. A Seção 6 apresenta as conclusões, e por fim a Bibliografia que possui referências destinadas ao leitor que deseja aprofundar mais sobre o assunto.

2. Conceitos Básicos

2.1. Processo MIG/MAG

O processo de soldagem MIG/MAG ou GMAW (Gas Metal ArcWelding) é uma técnica de soldagem com arco elétrico que utiliza um eletrodo consumível sem revestimento e protegido por gás. MIG refere-se a Metal Inert Gas, enquanto MAG significa Metal Active Gas, e GMAW é o termo genérico para ambos os processos. Neste método, os principais parâmetros regulados são a tensão de ajuste e a velocidade de alimentação do arame. Um arame com formato de eletrodo é alimentado de maneira automática ou semiautomática até o bico de contato. A soldagem resulta no depósito do metal fundido pelo arco elétrico na peça, formando uma poça de fusão protegida pelo gás escolhido. Esse processo é interessante pela sua versatilidade e facilidade de aplicação por robôs. Devido à alimentação contínua do arame e à alta densidade de corrente, de 100 a 250 A/mm², é amplamente empregado na indústria devido à sua elevada capacidade de produção e taxa de fusão [1].

2.2. Transferência por curto-circuito

A transferência por curto-circuito é um modo de transferência metálica onde a ponta líquida do arame-eletrodo entra em contato com a poça de fusão, causando um curto-circuito e a interrupção do arco. Devido à ação da tensão superficial, o metal da ponta é transferido para a poça. Este processo exige uma baixa energia de soldagem, resultando em uma solda com penetração limitada e rápida solidificação. A baixa corrente e tensão resultam em uma fraca força eletromagnética, permitindo que os arcos sejam curtos o suficiente para que a gota entre em contato com a poça antes de se separar. A frequência dessa transferência por curto-circuito varia de 20 a 200 vezes por segundo [1].

No processo de soldagem por curto-circuito, a etapa inicial é o crescimento da gota na ponta do arame. Inicialmente a gota cresce enquanto o arco arde. Enquanto cresce, o eletrodo empurra a gota em direção à poça, já que os baixos níveis de corrente não são capazes de produzir as forças necessárias para expulsá-la. À medida que a gota se aproxima da poça, há uma queda gradativa na tensão do arco, até que a gota toca a poça, ocasionando o curto-circuito, momento em que a tensão cai abruptamente e a corrente aumenta. Assim, ocorrem dois efeitos principais para que haja o destacamento da gota: o primeiro é a força de tensão superficial, no caso, a poça (maior relação volume/área superficial) atrai a gota (menor relação

volume/área superficial) para si; e o segundo efeito é o “pinch”, explicado pelo aumento repentino de corrente devido ao curto-circuito, tendo como consequência o aumento da força magnética (radial pra dentro) que estrangula a região que une a gota à ponta do eletrodo ainda sólido e causa o rompimento abrupto da ponte metálica. Esse efeito é responsável pela geração de respingos. Daí a importância da indutância, que segura a subida da corrente, podendo tornar a transferência mais suave, podendo reduzir a geração de respingos. Após este rompimento, há a transferência completa da gota e, em seguida, a reignição do arco elétrico, reiniciando o processo de transferência [1,6,7].

2.3. Gases de proteção

Os gases de proteção são inseridos na região de soldagem e têm a função de preservar a solda contra a influência do ar atmosférico, ao mesmo tempo em que estabilizam o arco de soldagem e afetam a geometria e a qualidade da solda [8]. As propriedades fundamentais dos gases de proteção incluem o potencial de ionização, a condutividade térmica, a dissociação e recombinação, o potencial de oxidação e a densidade do gás [9-15]. Para alcançar as melhores características de soldagem por curto-circuito, é crucial considerar o gás utilizado ao ajustar os parâmetros da fonte [16].

Os gases de proteção são classificados como inertes e ativos. Os gases inertes não reagem quimicamente com o metal de solda, sendo o argônio e hélio os mais comercialmente usados. Gases que apresentam reatividade com o metal de solda são classificados como ativos, sendo CO_2 e O_2 os mais utilizados.

2.4. Tensão e corrente de soldagem

Tensão de soldagem, velocidade de alimentação do arame-eletrodo, corrente de soldagem, velocidade de soldagem e vazão de gás de proteção representam os principais parâmetros da soldagem, cujos ajustes apropriados garantem uma solda de qualidade. É crucial manter esses parâmetros dentro dos limites de tolerância especificados durante o processo de soldagem [17]. Desvios em qualquer um desses parâmetros além dos limites desejados podem resultar em não conformidades na solda.

No processo de soldagem MIG/MAG, a importância de cada parâmetro não é uniforme. Tanto a tensão quanto a corrente de soldagem, além de suas funções primárias, exercem influência sobre a maioria das características do processo.

Cada modo de operação distinto no processo de soldagem MIG/MAG exibe diferentes curvas de tensão e corrente. A análise estatística desses dados é altamente relevante, pois oferece insights sobre as características e propriedades da fonte de energia, do cabeçote de alimentação, dos consumíveis de soldagem e da qualidade esperada do cordão de solda [18,19].

Para obter tais informações, é necessário analisar as curvas por meio da determinação de índices específicos. Os índices estatísticos embasados nos sinais elétricos produzidos possibilitam a análise das características dinâmicas da fonte de soldagem. Isso pode ser realizado usando índices como a taxa de subida e queda da corrente, além de seus efeitos sobre o comportamento do arco. Neste trabalho, os oscilogramas de corrente e tensão de soldagem serão empregados para identificar a estabilidade da soldagem MIG/MAG por curto-circuito.

2.5. Indutância

A função do indutor é criar resistência à variação da corrente. Com a mudança da corrente, o indutor gera uma corrente contrária à tendência de variação, agindo para evitar a alteração desse campo. Como resultado, observa-se uma corrente de subida ou descida amortecida.

O modo de transferência por curto-circuito é influenciado por certas características do equipamento, sendo a indutância a mais importante entre elas [20].

Fontes convencionais de soldagem controlam a indutância através de um indutor conectado em série com o arco, onde o aumento do valor regulado para a indutância implica o acréscimo da quantidade de bobinas ligadas ao indutor. Souza [21] estabelece uma relação entre o efeito indutivo e a posição de ajuste da indutância em duas fontes distintas, com escalas de regulação diferentes.

2.6. Estabilidade do processo

Uma grande variação nos valores do período de curto-circuito, assim como nos tempos de curto-circuito e de arco aberto, pode indicar instabilidade no processo. A alta incidência de respingos, devido à instabilidade do processo, é uma das principais limitações do uso da transferência por curto-circuito.

De acordo com Scotti e Ponomarev [1], a estabilidade do processo MIG/MAG é governada pela estabilidade do arco e da transferência metálica. Com a estabilidade desses dois fatores, a distribuição de calor transferido para a solda também se torna estável, mantendo constantes tanto a geometria do cordão de solda quanto as alterações metalúrgicas.

Os dois índices fundamentais utilizados para avaliar a consistência de um processo de soldagem por curto-circuito são o tempo de arco aberto (t_{ab}), que se refere à duração do crescimento da gota metálica fundida na ponta do eletrodo, e o tempo

de curto-circuito (t_{cc}), o intervalo durante o qual ocorre a transferência da gota fundida para a poça de fusão. Muitos outros índices secundários de transferência metálica são derivados de t_{ab} e t_{cc} , como os das Equações 1, 2 e 3:

$$P_{cc} = t_{ab} + t_{cc} \quad (1)$$

$$f_{cc} = \frac{1}{P_{cc}} \quad (2)$$

$$k_{cc} = \frac{t_{cc}}{P_{cc}} \quad (3)$$

onde P_{cc} é o período de curto-circuito, f_{cc} a frequência de curto-circuito e k_{cc} é a fração de tempo de curto-circuito num ciclo total de transferência.

Os valores de t_{ab} e t_{cc} podem ser automaticamente medidos por rotinas computacionais, utilizando dados coletados pelos oscilogramas. Ao usar um valor de referência para a tensão de soldagem de curto-circuito (U_{refcc}), um valor mais alto de tensão indica arco aberto, enquanto um valor mais baixo indica curto-circuito.

É viável analisar o processo aleatório da transferência por curto-circuito por meio de histogramas de seus parâmetros, como o t_{ab} , o t_{cc} e o P_{cc} . Os histogramas de tempos de t_{cc} evidenciam dois tipos de curto-circuitos: os incipientes, de curta duração, e os de maior duração [22]. O primeiro tipo pode não resultar em transferência para a poça de fusão, enquanto os de maior duração têm maior probabilidade de exibir transferência por tensão superficial. A distinção entre os dois tipos de curtos, os incipientes e os normais, está associada a diferentes fenômenos que afetam a soldagem, portanto, devem ser examinados separadamente. Às vezes, os histogramas de tempos de curto-circuito não apresentam uma separação clara entre os dois tipos. Para determinar se os curto-circuitos são incipientes, é necessário estabelecer um t_{cc} mínimo em que a transferência da gota ocorre. Em outras palavras, abaixo desse valor de t_{cc} , não há transferência da gota. Conforme estabelecido por Rezende et al. [22], os curto-circuitos com t_{cc} inferiores a 2 ms são considerados incipientes.

Determinar com precisão as dimensões exatas da gota com base apenas nos valores de t_{cc} e na taxa de alimentação do arame é inviável devido à ocorrência frequente de curtos-circuitos incipientes e transferências incompletas da gota metálica para a poça [22]. O t_{cc} é sensivelmente afetado pelos parâmetros da soldagem, notadamente o comprimento do arco de soldagem (tensão de soldagem) e a corrente média de soldagem [23].

A corrente média de soldagem é um parâmetro influenciado pela indutância do sistema. Maior indutância resulta em um aumento gradual da corrente e, conseqüentemente, em um t_{cc} mais prolongado. A temperatura da gota de soldagem e da poça de fusão também afeta a tensão superficial, o que, por sua vez, impacta diretamente o t_{cc} [23].

3. Métodos Estatísticos

A análise de variáveis por métodos estatísticos desempenha um papel crucial na compreensão das relações entre diferentes conjuntos de dados e na determinação das associações existentes entre as variáveis. Vários métodos estatísticos, como a correlação de Pearson, a correlação de Spearman, a correlação de Kendall e a ANOVA (Análise de Variância), são frequentemente empregados para investigar e quantificar essas relações [24,25].

Para aplicar esses métodos, é comum realizar um teste de normalidade para verificar se os dados seguem uma distribuição normal. Esse teste é fundamental, pois muitas técnicas estatísticas assumem a normalidade dos dados. Caso os dados não sigam uma distribuição normal, outras abordagens estatísticas robustas, como a correlação de Spearman e de Kendall são mais apropriadas [26].

3.1. Testes de normalidade

Os testes de normalidade são ferramentas usadas para determinar se um conjunto de dados de uma dada variável aleatória é bem modelada por uma distribuição normal. A distribuição normal, também conhecida como distribuição gaussiana, é uma distribuição simétrica em forma de sino caracterizada por sua média e desvio padrão. A utilização desses testes é fundamental, uma vez que muitos métodos estatísticos pressupõem normalidade nos dados. Para um teste de normalidade utilizamos a hipótese nula onde os dados seguem uma distribuição normal e a hipótese alternativa onde os dados não seguem uma distribuição normal.

O teste Shapiro-Wilk é sensível para amostras pequenas a moderadas. O teste de Kolmogorov-Smirnov testa a diferença cumulativa entre a distribuição observada e a teórica, e o teste de Anderson-Darling atribui pesos maiores às caudas da distribuição.

Originalmente o teste de Shapiro-Wilk tinha sua aplicação restrita a amostras de tamanhos inferiores a 50. Esse teste foi o pioneiro em identificar desvios da normalidade devido à assimetria, curtose, ou a ambos [27]. Dada uma amostra aleatória ordenada, representada por $y_1 < y_2 < \dots < y_n$, a estatística de teste original de Shapiro-Wilk é definida pela Equação 4:

$$w = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

onde n é o tamanho da amostra, x_i são os valores ordenados, $\bar{x}$ é a média da amostra e a_i são os coeficientes de ponderação específicos para a amostra. O valor de w está entre zero e um. Valores pequenos de w levam à rejeição da normalidade, enquanto o valor de 1 indica a normalidade dos dados.

O teste de Kolmogorov-Smirnov compara a distribuição acumulada empírica $F_n(x)$ com a distribuição acumulada teórica $F(x)$. A estatística de teste, denotada como D , é a maior diferença absoluta entre essas duas funções, dada pela Equação 5:

$$D = \max\{|F_n(x) - F(x)|\}. \quad (5)$$

A distribuição D , é usada para calcular a estatística de teste T , dada pela Equação 6:

$$T = \sqrt{n}D \quad (6)$$

onde n é o tamanho da amostra e T está relacionado ao desvio máximo entre as funções de distribuição acumulada empírica e teórica. Valores maiores de T indicam uma maior discordância entre os dados observados e a distribuição teórica.

O teste de Anderson-Darling é uma ferramenta estatística utilizada para avaliar a normalidade de uma distribuição de dados, sendo uma extensão do teste de Kolmogorov-Smirnov, dando mais peso às caudas da distribuição, o que a torna mais sensível a desvios nessas áreas. A estatística de teste de Anderson-Darling (A^2) é calculada com base nas diferenças entre as funções de distribuição acumulada empírica, $F_n(x)$, e teórica, $F(x)$. A fórmula geral para o cálculo de A^2 é dada pela Equação 7:

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i - 1) [\ln\{F(x_i)\} + \ln\{1 - F(x_{n+1-i})\}] \quad (7)$$

onde n é o tamanho da amostra, $F(x_i)$ é a função de distribuição acumulada teórica avaliada nos valores ordenados da amostra.

A estatística de teste segue uma distribuição específica, e a comparação entre A^2 calculado e os valores críticos dessa distribuição determina se há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula de que os dados seguem uma distribuição normal. A estatística de teste é calculada com base nas diferenças entre a distribuição observada e a teórica. O nível de significância, α , é geralmente estabelecido em 0,05. Se o valor p (p -value) resultante é menor que α , rejeita-se a hipótese nula, indicando que os dados não seguem uma distribuição normal [24].

3.2. Correlação de Pearson, Spearman e Kendal

A correlação de Pearson utiliza o coeficiente r , medida adimensional que pode assumir valores no intervalo entre -1 e $+1$, para medir a intensidade e a direção de relações lineares.

A correlação de Pearson é uma análise paramétrica para medir se duas variáveis estão relacionadas de maneira linear e a correlação de Spearman e Kendall são medidas não paramétricas da associação entre os postos das variáveis, mas não assumem uma relação linear específica, sendo particularmente úteis quando os dados não seguem uma distribuição normal ou quando há presença de outliers [24].

O coeficiente de correlação de Pearson r entre duas variáveis x e y em uma amostra de tamanho n é dada pela Equação 8:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

onde x_i e y_i são os valores individuais das duas variáveis, e $\bar{x}$ e $\bar{y}$ são as médias das variáveis x e y , respectivamente. Quando $r = 1$ diz-se que há correlação positiva perfeita (quando uma variável aumenta, a outra também aumenta de maneira linear), quando $r = -1$ há correlação negativa perfeita (quando uma variável aumenta, a outra diminui de maneira linear), e $r = 0$ indica ausência de correlação linear. O coeficiente de correlação de Pearson é sensível a relacionamentos lineares, o que significa que ele mede especificamente a força e a direção da relação linear entre as variáveis.

A correlação de Spearman é uma medida estatística que avalia a relação monotônica entre duas variáveis. A monotonicidade refere-se à tendência geral de uma variável aumentar ou diminuir junto com a outra, mas não necessariamente de forma linear. Em outras palavras, a correlação de Spearman avalia se existe uma relação sistemática, mesmo que não seja estritamente linear. O coeficiente de correlação de Spearman, denotado por ρ , é dado como na Equação 9:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (9)$$

onde d_i é a diferença entre os postos das observações nas duas variáveis e n é o número total de observações. Quando $\rho = 1$ a correlação é positiva perfeita monotônica (quando uma variável aumenta, a outra também aumenta de maneira monotônica), quando $\rho = -1$ a correlação é negativa perfeita monotônica (quando uma variável aumenta, a outra diminui de maneira monotônica), e quando $\rho = 0$ não existe correlação monotônica.

A correlação de Spearman é útil quando as relações entre as variáveis não são necessariamente lineares, mas ainda assim existe uma ordem ou padrão geral na associação. Ela é menos sensível a valores extremos do que a correlação de Pearson e é frequentemente utilizada quando os dados podem apresentar desvios da normalidade.

A correlação de Kendall, também conhecida como coeficiente tau de Kendall (τ), é uma medida estatística usada para avaliar a associação entre duas variáveis. Ao contrário da correlação de Pearson e de Spearman, a correlação de Kendall avalia a concordância nas ordens das observações, sem assumir uma relação linear ou monotônica específica. O coeficiente de Kendall é dado pela Equação 10:

$$\tau = \frac{N_{PC} - N_{PD}}{N_{TD}} \quad (10)$$

onde N_{PC} é o número de pares concordantes, N_{PD} é o número de pares discordantes e N_{TD} é o número total de pares distintos. Os pares concordantes são aqueles em que as ordens relativas das observações são as mesmas nas duas variáveis, enquanto os pares discordantes têm ordens relativas diferentes. O coeficiente de Kendall varia entre -1 e 1 , onde: $\tau = 1$: correlação perfeita positiva (todos os pares são concordantes); $\tau = -1$: correlação perfeita negativa (todos os pares são discordantes); e $\tau = 0$: ausência de correlação.

A correlação de Kendall é particularmente útil quando a ênfase está na ordem relativa das observações e não na magnitude exata das diferenças. Ela é robusta em relação a outliers e não assume uma relação linear ou monotônica entre as variáveis. Essa medida é frequentemente aplicada em áreas como estatística, ciências sociais, econometria e análise de dados em que a monotonicidade é mais relevante do que a linearidade.

A matriz de correlações é uma ferramenta estatística que fornece uma visão abrangente das relações entre as variáveis associadas a cada gás, revelando padrões de associação e destacando possíveis interações complexas. Ao incorporar o grau de significância nas correlações, a matriz não apenas identifica a força e direção dessas relações, mas também indica se essas associações são estatisticamente robustas, sendo uma ferramenta valiosa para elucidar padrões específicos associados a cada variável, fornecendo uma base sólida para a interpretação e comparação dos resultados obtidos em diferentes condições experimentais.

3.3. ANOVA e Kruskal-Wallis

A análise de variância, ou ANOVA, é uma abordagem para comparar dados com diversas médias entre diferentes grupos, permitindo enxergar padrões e tendências com dados complexos e variados. Foi desenvolvida por Sir Ronald Aylmer Fisher em 1920. ANOVA é uma extensão do teste t para comparar as médias de dois grupos para o caso de mais de dois grupos. A ANOVA de uma via deve ser utilizada quando a sua variável resposta é contínua (Y) e a sua variável explanatória é categórica (X). Além disso, normalmente, a ANOVA de uma via é usada para testar diferenças entre pelo menos três grupos e determina se qualquer uma delas é estatisticamente diferente das outras [24,25].

O procedimento geral envolve a decomposição da variabilidade total dos dados em componentes atribuíveis às diferenças entre os grupos e à variação dentro dos grupos. Isso é feito calculando-se a variância entre os grupos (variância do tratamento) e a variância dentro dos grupos (variância do erro). A comparação dessas variâncias por meio do teste F de Fisher determina se existe uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos [24,25].

O Teste de Kruskal-Wallis é uma técnica estatística não paramétrica usada para determinar se há diferenças significativas entre os grupos de uma variável independente quando os dados não atendem aos pressupostos para a ANOVA. A técnica foi proposta independentemente por três estatísticos: William H. Kruskal, Wilson Allen Wallis e J. Wolowski, na década de 1950.

O Teste de Kruskal-Wallis é usado quando se deseja comparar as medianas de três ou mais grupos independentes. A aplicação típica é quando os dados não são normalmente distribuídos ou quando a homogeneidade de variâncias não é atendida, condições necessárias para a ANOVA [25].

O procedimento envolve a classificação de todas as observações de todos os grupos combinados, seguida pela soma das classificações em cada grupo. Essas somas são usadas para calcular uma estatística de teste que, sob a hipótese nula de que as amostras são da mesma população, segue uma distribuição qui-quadrado.

3.4. PostHoc de Duncan, Tukey e Bonferroni

O teste post hoc de Duncan é uma ferramenta estatística utilizada para comparar grupos entre si após a realização de uma análise de variância (ANOVA). Esta análise de variância é realizada inicialmente para testar a hipótese nula de igualdade das médias dos grupos. Se a ANOVA indicar que há diferenças significativas entre pelo menos alguns dos grupos, o teste de Duncan é aplicado para identificar quais grupos são estatisticamente diferentes entre si.

Nesse processo, as médias dos grupos são ordenadas da maior para a menor, e intervalos $\bar{Q}$ são calculados para cada par de médias, sendo $\bar{Q}$ a diferença entre as médias dividida pelo erro padrão da diferença. Em seguida, compara-se o valor calculado de $\bar{Q}$ com um valor crítico tabelado para determinar se a diferença entre as médias é estatisticamente significativa. Com base nesses resultados, grupos com diferenças significativas são identificados.

O teste de comparação múltipla de Tukey é uma técnica estatística utilizada após a realização de uma análise de variância (ANOVA) para identificar quais grupos apresentam diferenças significativas em suas médias. Após a ANOVA indicar que há pelo menos uma diferença significativa entre as médias dos grupos, o teste de Tukey é aplicado para realizar comparações entre todos os pares de grupos e determinar quais dessas diferenças são estatisticamente significativas.

No processo de aplicação do teste de Tukey, as médias dos grupos são comparadas em termos de intervalos de confiança simultâneos. Se a diferença entre as médias de dois grupos específicos for maior que o intervalo de confiança, considera-se que essas médias são estatisticamente diferentes.

O procedimento de Bonferroni é uma técnica de ajuste de correção usada em testes de comparação múltipla. Após a realização de uma análise de variância (ANOVA) ou outro teste estatístico que revela diferenças significativas entre as médias de grupos, o procedimento de Bonferroni é aplicado para evitar a inflação do erro ao realizar comparações múltiplas.

Ao contrário de métodos como o teste de Tukey, que utiliza intervalos de confiança simultâneos, o procedimento de Bonferroni ajusta o nível de significância para cada comparação individual, isto é, o limiar para considerar uma diferença como estatisticamente significativa deve ser ajustado para evitar falsas descobertas. O procedimento de Bonferroni calcula um novo nível de significância (α/n , onde n é o número total de comparações) e compara cada valor- p individual com esse novo limiar. Se o valor- p para uma comparação específica for menor que α/n , a diferença entre os grupos é considerada estatisticamente significativa.

3.5. Séries temporais

Séries temporais são conjuntos de dados organizados em ordem cronológica, geralmente com intervalos uniformes entre as observações. O estudo de séries temporais remonta ao século XIX, mas a formalização matemática e estatística se deu no século XX. O desenvolvimento da teoria das séries temporais está fortemente relacionado ao campo da econometria e à necessidade de modelar e prever fenômenos econômicos ao longo do tempo [28,29].

Uma série temporal é uma sequência de observações de uma variável ao longo do tempo. Essas observações são geralmente feitas em intervalos regulares, como diários, mensais, trimestrais ou anuais. As séries temporais são essenciais para prever comportamentos futuros, identificar tendências e padrões, podendo ser encontradas em várias áreas, incluindo finanças, economia, meteorologia, medicina e muitas outras [30-33].

Dentre as características das séries temporais temos a presença de uma tendência, direção geral da série ao longo do tempo, que pode ser ascendente, descendente ou inexistente. A sazonalidade também é uma característica importante, referindo a padrões que se repetem em intervalos regulares de tempo. Há também a presença de componentes irregulares ou residuais, variação não explicada pela tendência, sazonalidade ou ciclo, muitas vezes refletindo aleatoriedade.

A análise e modelagem de séries temporais envolvem métodos estatísticos e matemáticos para entender padrões, fazer previsões e inferências. Modelos como ARIMA (Auto Regressive Integrated Moving Average) e modelos sazonais são frequentemente utilizados, e ferramentas modernas incluem métodos de aprendizado de máquina para lidar com padrões complexos [29,34-36].

4. Materiais e Métodos

Nos experimentos foram utilizadas chapas de aço carbono com 10 mm de espessura. O arame eletrodo utilizado nas soldagens foi o AWS ER70S-6, com diâmetro de 1,2 mm [37]. O processo de soldagem foi executado por um robô Yaskawa de 6 graus de liberdade, controlado pelo sistema dx100 Motoman HP20D. Este sistema oferece a vantagem de manter a velocidade de soldagem e a distância de bico à peça (DBCP) constante durante o procedimento. A fonte de soldagem utilizada foi a IMC Digiplus A7, uma fonte multiprocesso com uma central refrigeradora para resfriar a tocha de soldagem. Os gases empregados para soldagem (Ar, Ar+25% CO₂, e CO₂) foram adquiridos da empresa White Martins.

Para aquisição e análise dos dados, foi utilizado um condicionador de sinais que coletou dados de tensão e corrente a uma taxa de 5 kHz. O sistema de aquisição é composto por um condicionador de sinais, uma placa de aquisição (NI 6009 do fabricante National Instruments) e um software implementado na plataforma LabView. As avaliações dos parâmetros relacionados à soldagem foram realizadas por meio de programas desenvolvidos em RStudio.

Os experimentos foram conduzidos utilizando um robô conectado à fonte, mantendo a distância de bico à peça em 12 mm. Durante os experimentos, foram registrados dados da tensão e corrente de soldagem. Todos os testes foram executados na posição plana, com o cordão depositado sobre uma chapa.

A velocidade de soldagem e a velocidade de alimentação foram fixadas, e variando os ajustes de indutância da fonte (ks) para os três gases distintos em três tensões de soldagem diferentes, como mostra a Tabela 1. Destacamos que somente ks foi variado enquanto kd foi fixado no valor de 60. A velocidade de alimentação foi mantida constante em 3 m/min, e a velocidade

de soldagem em 40 cm/min. Em cada experimento foi produzido um cordão de solda com aproximadamente 150 mm de comprimento.

Os dados coletados foram processados por meio de um programa implementado em RStudio, o qual utilizou informações de tensão e corrente durante os experimentos para calcular os valores obtidos no processo de soldagem, como tempo de curto-circuito, tempo de arco aberto, tensão de curto-circuito, tensão de arco aberto e taxa de subida da corrente durante o curto-circuito. A matriz de correlações foi criada a partir das médias dos valores para todos os parâmetros em todos os experimentos.

Tabela 1. Parâmetros de soldagem utilizados nos testes.

Ar				Ar+25% CO ₂			CO ₂	
20 V	18 V	17 V	22 V	20 V	19 V	24 V	22 V	21 V
30	30	30	30	30	30	30	30	30
60	60	60	60	60	60	60	60	60
80	90	90	80	90	90	80	90	90
90	180	120	110	120	120	110	120	120
120	210	150	140	150	150	140	150	150
150	240	180	170	180	180	170	180	180
180	270	210	200	210	210	200	210	x
200	x	240	230	240	240	230	x	x
x	x	270	x	270	270	x	x	x

Considerando que as tensões de arco aberto e curto-circuito são distintas e discerníveis, um histograma foi construído com 15 intervalos iguais para identificar a variável mencionada neste estudo como tensão de referência. Essa tensão representa um valor que separa as tensões dos dois modos de operação, evidenciando-se como um ponto de destaque nos outliers entre as duas distribuições, conforme ilustrado no gráfico da Figura 1. Ressaltamos que o histograma apresentado na Figura 1 é realizado sobre todas as tensões do gás Ar+CO₂, 20 V e ks = 90. A estratégia foi dividir todas as observações em 15 intervalos e achar uma tensão limite que dividisse os dados em duas categorias: 1) tensão de curto circuito (a primeira curva) e 2) tensão de arco aberto (segunda curva). Este procedimento visa criar uma variável auxiliar denominada “tensão de referência”. Os mesmos histogramas foram feitos para outros tipos de gases, voltagens e ks’s, obtendo-se o mesmo comportamento para todos.

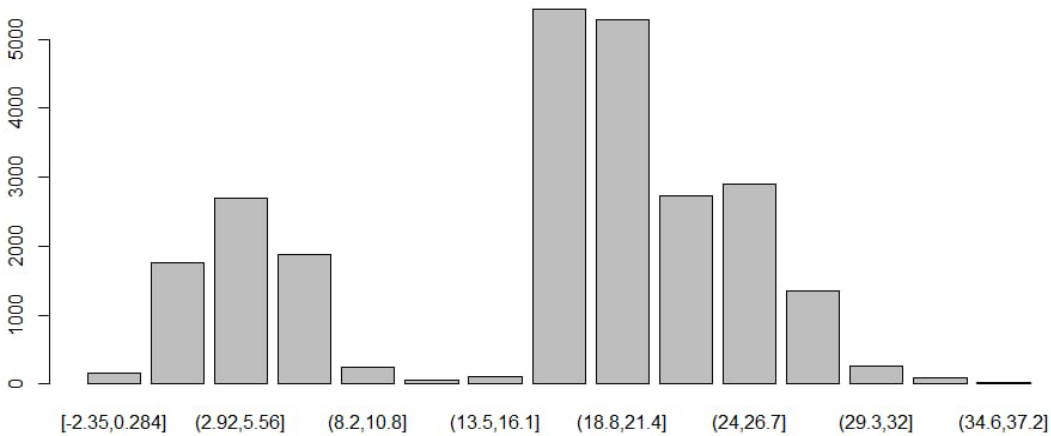


Figura 1. Histograma dos valores de tensão de soldagem divididos em 15 intervalos.

5. Resultados e Discussão

Nesta seção são apresentados os resultados e as análises dos dados coletados. Inicialmente, foram aplicados os testes de normalidade de Shapiro-Wilk, Komogorov-Smirnov e Anderson-Darling, nos valores extraídos dos dados de tensão e corrente de soldagem. Esses valores incluem tempo de curto-circuito, tempo de arco aberto, tensão de curto-circuito, tensão de arco aberto e taxa de subida da corrente durante o curto-circuito. Em seguida, procedeu-se a realização de testes de correlação, empregando os métodos de Pearson, Spearman e Kendall para avaliar associações entre pares de valores. Tais testes foram realizados apenas no experimento feito com o Ar+CO₂ com tensão de 19 V e taxa de subida da corrente de 19,63 A/ms.

Posteriormente, foi elaborada uma matriz de correlações entre as médias de todos os valores obtidos para os três gases testados (Ar, Ar+CO₂ e CO₂). Considerando os gases como grupos distintos, foram conduzidos testes de ANOVA e Kruskal-Wallis, seguidos por análises post hoc, com o intuito de identificar possíveis diferenças entre os gases. Esse processo permitiu uma abordagem abrangente na análise estatística dos dados, explorando tanto a normalidade das distribuições quanto as relações entre os valores obtidos, culminando na avaliação de variações significativas entre os grupos de gases.

5.1. Teste de normalidade

Os dados coletados para as variáveis de interesse foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk para avaliar a normalidade. Os resultados revelam que o tempo de curto-circuito não segue uma distribuição normal, t_{ab} ($w = 0,97108$; $p = 0,0007892$), o tempo de arco aberto demonstrou não seguir uma distribuição normal, t_{cc} ($w = 0,50024$; $p = 2,2 \times 10^{-16}$). A análise da tensão de curto-circuito também revelou uma não normalidade nos dados, conforme indicado pela estatística de teste ($w = 0,63817$; $p = 2,2 \times 10^{-16}$), a tensão de arco aberto apresentou distribuição normal, evidenciada pela estatística de teste ($w = 0,99429$; $p = 0,7136$). Por fim, a taxa de subida da corrente durante o curto-circuito não seguiu uma distribuição normal, conforme indicado pela estatística de teste ($w = 0,98351$; $p = 2,2 \times 10^{-16}$). É relevante salientar que, além dos testes de Shapiro-Wilk, foram realizados testes de Komogorov-Smirnov e Anderson-Darling. No entanto, esses últimos não se mostraram tão eficazes para o conjunto de dados em questão.

5.2. Testes de correlação dos dados

Os resultados das análises de correlação entre o tempo de curto-circuito e o tempo de arco aberto indicam a falta de uma correlação significativa. O teste de correlação de Pearson ($r = 0,8606$; $p = 0,8606$), a correlação de Spearman ($\rho = 0,1435837$; $p = 0,05381$) e a correlação de Kendall ($\tau = 0,09190987$; $p = 0,06926$), indicam que não há uma relação estatisticamente relevante entre essas variáveis.

Ao examinar a relação entre o tempo de curto-circuito e a tensão de arco aberto, os resultados dos testes apontam para a ausência de uma correlação estatisticamente relevante. Pearson não indicou uma correlação significativa ($cor = 0,03557548$; $p = 0,6345$); da mesma forma, a correlação de Spearman não mostrou evidência de correlação ($\rho = 0,05540823$; $p = 0,4588$), bem como a correlação de Kendall ($\tau = 0,0391346$; $p = 0,4379$).

Quanto a possível correlação entre a tensão de arco aberto e a taxa de subida da corrente, os resultados dos testes indicam a inexistência de uma correlação estatisticamente significativa. A correlação de Pearson não evidenciou uma correlação significativa ($cor = 0,1270387$; $p = 0,08834$); de maneira semelhante, a correlação de Spearman não indicou uma correlação ($\rho = -0,05752344$; $p = 0,4418$), assim como a correlação de Kendall ($\tau = -0,04193142$; $p = 0,402$).

Analisando a possível correlação entre o tempo de arco aberto e a tensão de curto-circuito, os testes revelaram que: a correlação de Pearson indica uma correlação significativa ($cor = 0,2965003$; $p = 5,059 \times 10^{-5}$); no entanto, ressalta-se que os dados não atendem aos pré-requisitos para este teste, tornando esse resultado menos confiável. Em contraste, tanto a correlação de Spearman ($\rho = -0,1287027$; $p = 0,08422$) quanto a correlação de Kendall ($\tau = -0,09998195$; $p = 0,04629$) não evidenciaram correlações estatisticamente relevantes. Diante disso, a interpretação dos resultados sugere que a relação pode não ser estatisticamente significativa, como mostra o gráfico de dispersão na Figura 2.

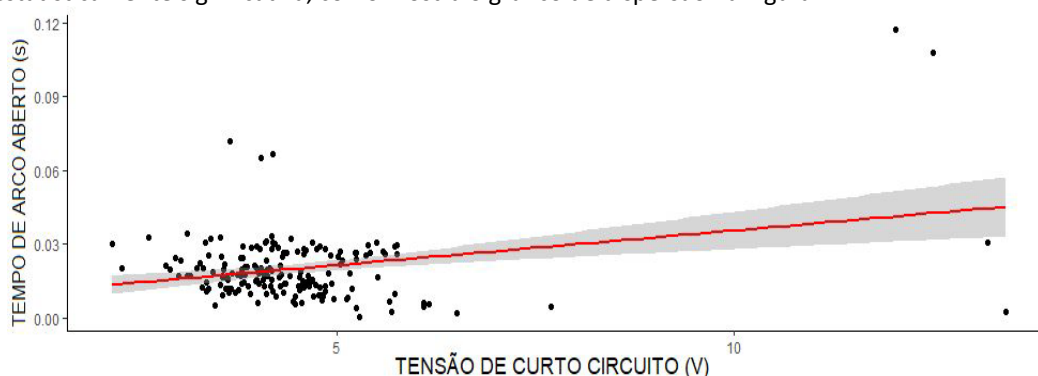


Figura 2. Gráfico de dispersão para tensão de curto-circuito e tempo de arco aberto.

A análise da possível correlação entre o tempo de arco aberto e a taxa de subida da corrente também alcança resultados conflitantes. A correlação de Pearson apontou uma correlação significativa ($cor = -0,1946624$; $p = 0,008641$); entretanto os dados não atendem aos pré-requisitos para este teste, implicando em uma confiabilidade reduzida desse resultado. Por outro lado, tanto a correlação de Spearman ($\rho = 0,09750172$; $p = 0,1916$) quanto a correlação de Kendall ($\tau = 0,07517808$; $p = 0,1341$) não evidenciaram correlações estatisticamente relevantes. Diante desse contexto, a interpretação dos resultados sugere que essa relação pode não ser estatisticamente significativa, sendo possível verificar isso no gráfico da Figura 3.

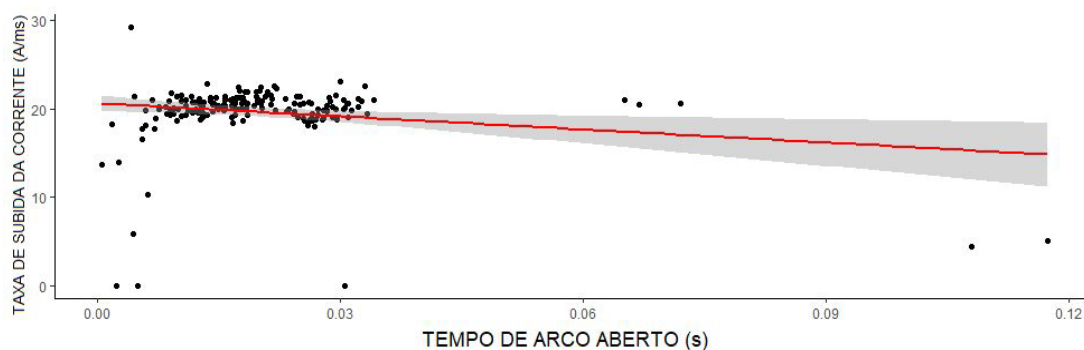


Figura 3. Gráfico de dispersão para tempo de arco aberto e taxa de subida da corrente.

Os resultados dos testes estatísticos aplicados às variáveis tensão de curto-circuito e tensão de arco aberto foram conflitantes. A correlação de Pearson revelou uma associação negativa, mas fraca, entre essas variáveis ($cor = -0,1667$; $p = 0,0249$). Contudo, é crucial notar que os dados não atendem aos pré-requisitos necessários para este teste, o que levanta dúvidas sobre a confiabilidade do valor de correlação obtido. Análises adicionais utilizando a correlação de Spearman indicaram a ausência de uma relação significativa ($\rho = 0,09028393$; $p = 0,2265$), enquanto a correlação de Kendall corroborou essa constatação, demonstrando a falta de correlação estatisticamente relevante ($\tau = 0,06691222$; $p = 0,09028393$). Ao comparar os resultados dos testes e analisar o gráfico da Figura 4, pode-se concluir que a correlação entre a tensão de curto-circuito e a tensão de arco aberto não é estatisticamente relevante.

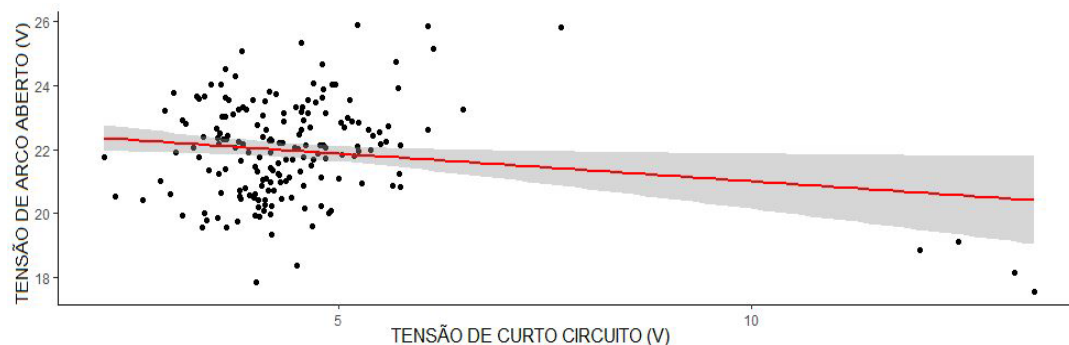


Figura 4. Gráfico de dispersão para tensão de curto-circuito e tensão de arco aberto.

Os resultados dos testes para tempo de curto-circuito e tensão de curto-circuito também foram conflitantes. A distribuição de pontos no gráfico de resíduos *versus* valores previstos revelou uma falta de homogeneidade, Figura 5, indicando a ausência de homocedasticidade nos dados. Além disso, a análise do gráfico sugere uma relação não linear entre as variáveis. No gráfico de resíduos padronizados, não foram identificados outliers, contudo, nessas circunstâncias, a confiabilidade do teste de Pearson pode ser comprometida.

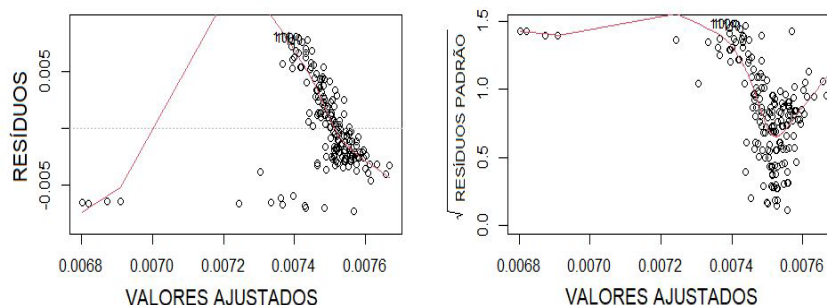


Figura 5. Gráfico de resíduos e resíduos padronizados para tempo de curto-circuito e tensão de curto-circuito.

Ao aplicar o teste de Pearson, constatou-se que a correlação entre o tempo de curto-circuito e o tempo de arco aberto não é significativa ($cor = -0,03168855$; $p = 0,6711$). Em contrapartida, a correlação de Spearman evidenciou que o valor dessa correlação é estatisticamente diferente de zero ($\rho = 0,4688246$; $p = 2,473 \times 10^{-11}$), e a correlação de Kendall indicou

uma correlação significativa entre esses tempos ($\tau = 0,4138907$; $p = 2,2 \times 10^{-16}$). É importante observar que os valores das correlações de Spearman e Kendall foram próximos, e o gráfico de dispersão também mostra uma forte correlação, Figura 6.

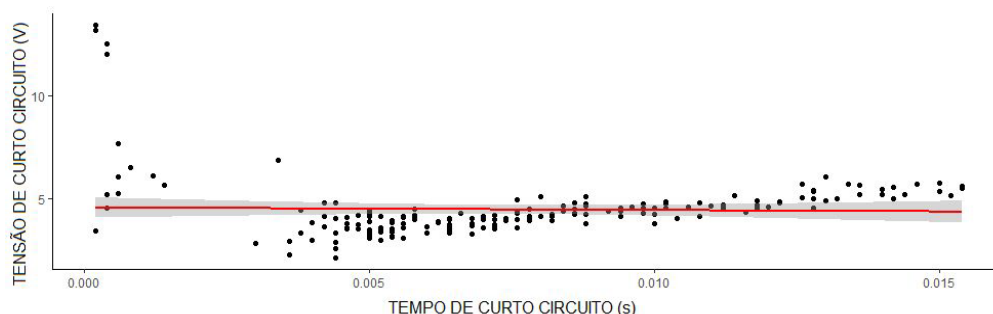


Figura 6. Gráfico de dispersão para tempo de curto-circuito e tensão de curto-circuito.

A observação da distribuição de pontos no gráfico de resíduos versus valores previstos revelou uma falta de homogeneidade, Figura 7, indicando a ausência de homocedasticidade nos dados. Além disso, a análise do gráfico sugere que a relação entre as variáveis não é linear. No gráfico de resíduos padronizados, não foram identificados outliers, o que sugere a ausência de pontos discrepantes nos resíduos. Diante dessas circunstâncias, é importante destacar que o teste de Pearson pode não ser confiável.

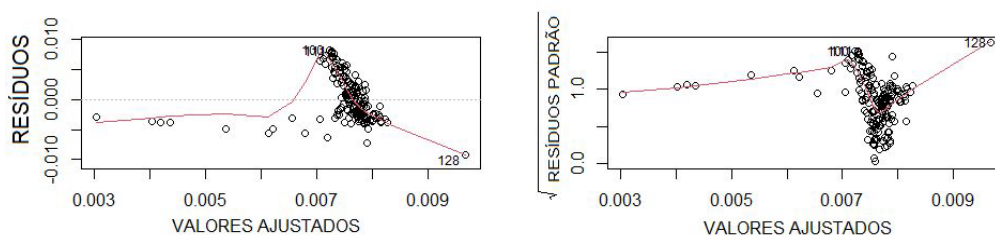


Figura 7. Gráfico de resíduos e resíduos padronizados para tempo de curto-circuito e tensão de curto-circuito.

Ao analisar as correlações, o coeficiente de Pearson indicou uma correlação significativa entre o tempo de curto-circuito e o tempo de arco aberto ($cor = 0,2254018$; $p = 0,002218$). Porém, a correlação de Spearman revelou que o valor da correlação entre essas variáveis é estatisticamente diferente de zero ($\rho = -0,3538187$; $p = 9,593 \times 10^{-7}$). A correlação de Kendall também apontou para a existência de uma correlação entre o tempo de curto-circuito e o tempo de arco aberto ($\tau = -0,3079813$; $p = 9,243 \times 10^{-10}$). É relevante observar que os valores das correlações de Spearman e Kendall foram semelhantes entre si, mas diferiram da correlação de Pearson. Esses resultados ressaltam a importância de considerar a análise do gráfico de dispersão, Figura 8.

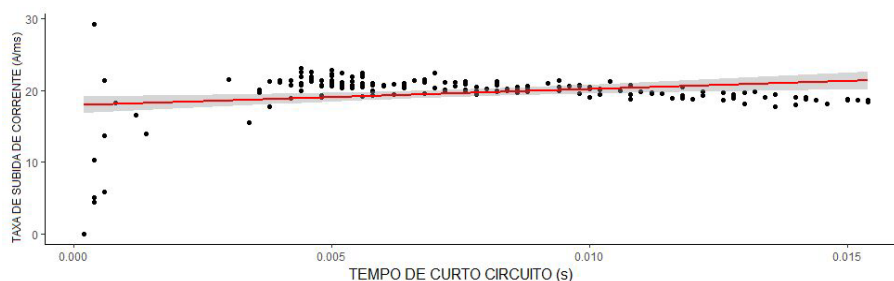


Figura 8. Gráfico de dispersão para tensão de curto-circuito e tensão de arco aberto.

Os resultados dos testes aplicados às variáveis de tempo de arco aberto e tensão de arco aberto apontaram a homogeneidade da distribuição de pontos no gráfico de resíduos versus valores previstos, conforme ilustrado na Figura 9, sugerindo a presença de homocedasticidade nos dados. Além disso, a inspeção do gráfico revelou uma relação linear notável entre essas variáveis. A avaliação dos resíduos padronizados, conforme a Figura 9, não revelou a presença de outliers, satisfazendo os critérios necessários para o teste de Pearson.

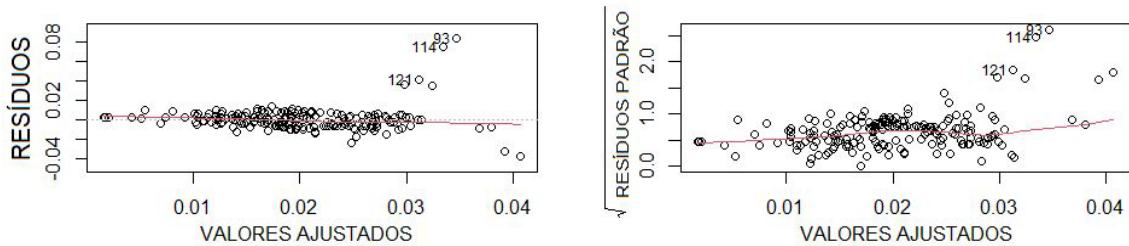


Figura 9. Gráfico de resíduos e resíduos padronizados para tempo de arco aberto e tensão de arco aberto.

A aplicação do teste de Pearson destacou uma correlação significativa entre o tempo de curto-circuito e o tempo de arco aberto ($cor = -0,5102547$; $p = 2,177 \times 10^{-13}$). Os resultados da correlação de Spearman indicaram que essa associação é estatisticamente diferente de zero ($\rho = -0,5799545$; $p < 2,2 \times 10^{-16}$), enquanto a correlação de Kendall também apontou para uma relação significativa entre esses tempos ($\tau = -0.4243076$; $p < 2,2 \times 10^{-16}$). É importante salientar que os valores das correlações de Pearson, Spearman e Kendall, apresentados na Figura 10, mostraram uma proximidade entre si, consolidando a consistência dos resultados obtidos por meio de diferentes abordagens de correlação.

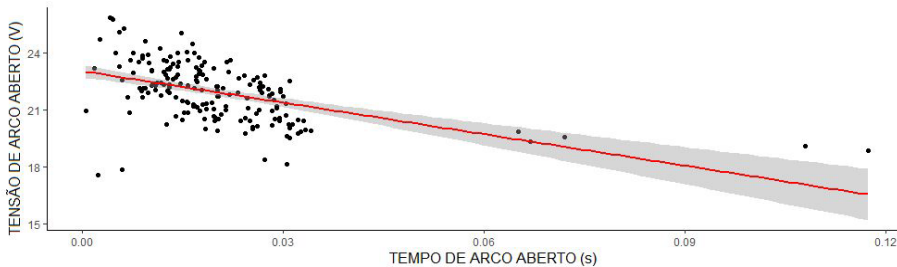


Figura 10. Gráfico de dispersão para tempo de arco aberto e tensão de arco aberto.

5.3. Matriz de correlações

Na matriz de correlações do argônio, Figura 11, nota-se que o tempo de curto-circuito apresenta correlações significativas com diversos valores obtidos do processo de soldagem. Notadamente, está correlacionado negativamente com a taxa de subida da corrente ($-0,59$), a tensão de curto-circuito ($-0,48$) e a tensão de referência ($-0,36$). Para o tempo de arco aberto destaca-se uma correlação mais acentuada com o número de curtos ($-0,93$), além de correlações positivas com a taxa de subida da corrente ($0,52$) e a tensão de curto-circuito ($0,49$). Por sua vez, a tensão de curto-circuito demonstra forte correlação com a taxa de subida da corrente ($0,8$), o número de curtos ($-0,46$) e a tensão de referência ($0,82$). Já a tensão de arco aberto apresenta correlações mais fracas, sendo notáveis com a tensão de referência ($0,53$) e o número de curtos ($-0,19$). Observa-se que, entre esses valores, a tensão de arco aberto e a taxa de subida da corrente emergem como os mais influentes, destacando-se a última como o fator de maior impacto na execução do processo de soldagem.

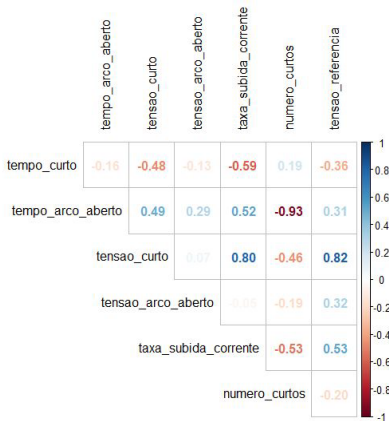


Figura 11. Matriz de correlação com o grau de significância para o argônio.

Na mistura de argônio mais dióxido de carbono, Figura 12, os valores obtidos do processo de soldagem apresentam correlações distintas. Destaca-se que o tempo de curto-circuito revela uma forte correlação negativa com a tensão de curto-circuito (−0,76), a tensão de referência (−0,49) e a taxa de subida da corrente (−0,37). O tempo de arco aberto demonstra correlação mais intensa com o número de curtos (−0,88), a taxa de subida da corrente (0,62) e a tensão de arco aberto (0,48). A tensão de curto-circuito apresenta uma correlação significativa com a tensão de referência (0,72), além de correlações mais fracas com o número de curtos (−0,28) e a tensão de arco aberto (−0,31). Enquanto isso, a tensão de arco aberto exibe correlações mais suaves com o número de curtos (−0,42) e a taxa de subida da corrente (0,26).

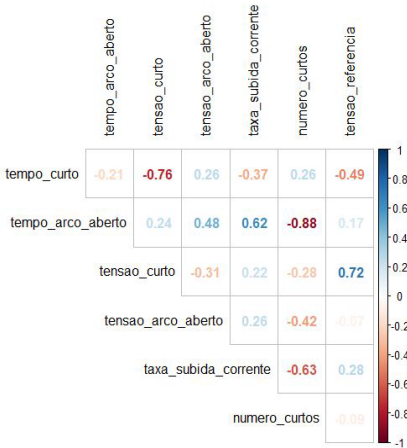


Figura 12. Matriz de correlação com o grau de significância para o argônio mais dióxido de carbono.

Para o dióxido de carbono, Figura 13, observa-se que os valores obtidos do processo de soldagem apresentam correlações distintas. O tempo de curto-circuito revela uma correlação mais robusta com a tensão de curto-circuito (−0,63), enquanto mantém correlações mais suaves com a tensão de referência (−0,37), a taxa de subida da corrente (−0,43) e o tempo de arco aberto (−0,41). Destaca-se no tempo de arco aberto, uma forte correlação negativa com o número de curtos (−0,79) e uma correlação mais intensa com a taxa de subida da corrente (0,87), apresentando uma relação mais fraca com a tensão de curto-circuito (0,34). A tensão de curto-circuito demonstra forte correlação com a tensão de arco aberto (−0,75) e correlações mais suaves com o número de curtos (−0,48) e a tensão de referência (0,61). Enquanto isso, a tensão de arco aberto exibe correlações mais fracas com a tensão de referência (−0,45) e o número de curtos (0,29).

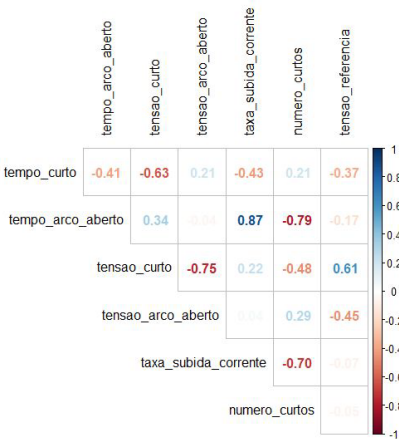


Figura 13. Matriz de correlação com o grau de significância para o dióxido de carbono.

Em todos os experimentos, a correlação entre o tempo de arco aberto e o número de curtos exibiu padrões notavelmente similares, para o argônio (−0,93), para a mistura de argônio mais dióxido de carbono (−0,88) e para o dióxido de carbono puro (−0,79). Da mesma forma, a correlação entre o tempo de arco aberto e a taxa de subida da corrente apresentou consistência nos padrões com o argônio (0,52), para mistura de argônio mais dióxido de carbono (0,62) e para o dióxido de carbono puro (0,8).

Em todos os experimentos, as correlações entre a taxa de subida da corrente e o número de curtos, o tempo de curto e a tensão de curto-circuito, assim como a correlação entre a tensão de curto-circuito e a tensão de referência demonstraram consistência, embora menos significativas. A correlação entre a taxa de subida da corrente e o número de curtos foi para o argônio de $(-0,53)$, para o argônio mais dióxido de carbono $(-0,63)$ e para o dióxido de carbono $(-0,7)$. A correlação entre o tempo de curto e a tensão de curto-circuito foi para o argônio $(-0,48)$, para o argônio mais dióxido de carbono $(-0,76)$ e para o dióxido de carbono $(-0,63)$. A correlação entre a tensão de curto-circuito e a tensão de referência foi para o argônio $(0,82)$, para o argônio mais dióxido de carbono $(0,72)$ e para o dióxido de carbono $(0,61)$.

5.4. ANOVA, Kruskal-Wallis e Post hoc

A análise estatística realizada para avaliar a influência do tipo de gás na tensão de curto-circuito foi conduzida utilizando um teste de ANOVA de uma via, seguido por testes post-hoc específicos. Inicialmente, verificou-se que os dados de tensão de curto-circuito apresentaram distribuição normal para todos os gases, teste de Shapiro-Wilk (Ar: $w = 0,9570$, $p = 0,38194$; Ar+CO₂: $w = 0,9295$, $p = 0,08453$; CO₂: $w = 0,9101$, $p = 0,05509$). No entanto, ao realizar o teste de homogeneidade de Levene, constatou-se que os dados não são homogêneos ($p = 0,01968$), podendo acarretar imprecisões na ANOVA.

A ANOVA de uma via revelou que existe um efeito significativo do tipo de gás sobre a média da tensão de curto-circuito [$F(2,67) = 5,489$; $p = 0,0062$]. O teste post-hoc de Duncan indicou diferenças estatisticamente significativas entre os gases CO₂ e Ar ($p = 0,0259$), assim como entre Ar e Ar+CO₂ ($p = 0,0028$), enquanto não houve diferença significativa entre CO₂ e Ar+CO₂ ($p = 0,4258$).

Por sua vez, os testes post-hoc de Tukey e Bonferroni destacaram apenas a diferença entre Ar+CO₂ e Ar como estatisticamente significantes, $p = 0,0057$ e $p = 0,0061$, respectivamente. Esses resultados ressaltam a sensibilidade do tipo de gás utilizado, Figura 14, indicando que a composição gasosa influencia de maneira significativa as médias de tensão de curto-circuito.

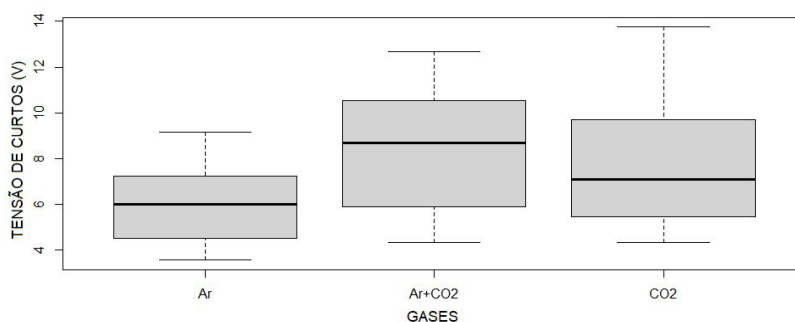


Figura 14. Boxplot dos valores de tensão de curto-circuito para os três gases.

Para avaliar a taxa de subida da corrente, considerando diferentes gases, foi realizado inicialmente o teste de Shapiro-Wilk para os dados dessa variável, o qual indicou que a distribuição da taxa de subida da corrente apresentou normalidade para todos os gases analisados (Ar: $w = 0,9701$, $p = 0,6688$; Ar+CO₂: $w = 0,9485$, $p = 0,2314$; CO₂: $w = 0,9464$, $p = 0,2909$), e o teste de homogeneidade de Levene mostrou que os dados são homogêneos ($p = 0,7787$). Assim, o teste ANOVA é indicado neste caso.

Ao realizar a ANOVA de uma via para analisar a influência do tipo de gás na média da taxa de subida da corrente, não foram identificados efeitos significativos [$F(2,67) = 0,338$; $p = 0,715$]. Esses resultados indicam que a variação no tipo de gás utilizado não demonstrou impacto estatisticamente significativo na média da taxa de subida da corrente, Figura 15.

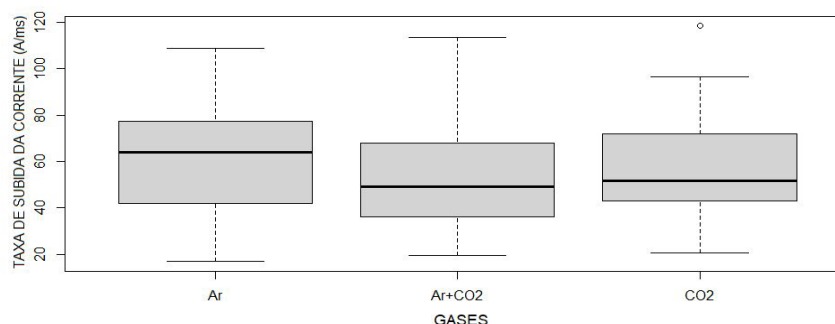


Figura 15. Boxplot dos valores de taxa de subida da corrente durante o curto-circuito para os três gases.

A análise estatística referente ao número de curtos, considerando diferentes gases, indica que dos gases analisados, apenas o CO₂ não apresentou uma distribuição normal, conforme evidenciado pelo teste de Shapiro-Wilk (Ar: $w = 0,9226$, $p = 0,0668170$; Ar+CO₂: $w = 0,9683$, $p = 0,6014685$; CO₂: $w = 0,8045$, $p = 0,0007696$). Ao realizar o teste de homogeneidade de Levene, verificou-se que os dados não são homogêneos ($p = 0,02808$). Neste caso a ANOVA pode não ter um resultado preciso.

Ao proceder com a ANOVA de uma via, constatou-se um efeito significativo do tipo de gás na média do número de curtos [$F(2,67) = 102,8$; $p = 0,0136$]. O teste posthoc de Duncan revelou diferenças estatisticamente significativas entre os gases CO₂ e Ar ($p = 0,0059$) e entre CO₂ e Ar+CO₂ ($p = 0,0369$), enquanto não houve diferença significativa entre os gases Ar e Ar+CO₂ ($p = 0,1861$).

Adicionalmente, os testes post-hoc de Tukey e Bonferroni apontaram que apenas as médias entre CO₂ e Ar são estatisticamente significantes ($p = 0,0117$ e $p = 0,0127$, respectivamente). Esses resultados evidenciam a disparidade entre os testes, que mostra o CO₂ distintamente destacado em comparação com os demais gases, Figura 16.

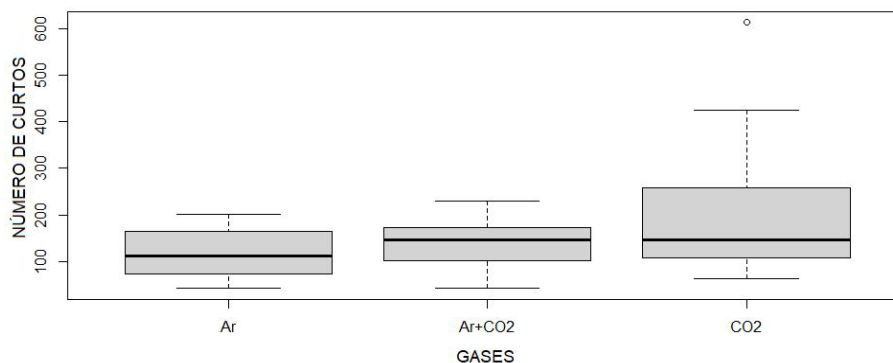


Figura 16. Boxplot dos valores de números de curto-circuito para os três gases.

Analisando a tensão de referência, o teste de Shapiro-Wilk indica que todos os gases analisados apresentaram uma distribuição normal para a variável (Ar: $w = 0,9261$, $p = 0,07979$; Ar+CO₂: $w = 0,9464$, $p = 0,20729$; CO₂: $w = 0,9343$, $p = 0,16814$). Além disso, ao realizar o teste de homogeneidade de Levene, observou-se que os dados são homogêneos ($p = 0,556$). Assim, a ANOVA é indicada para estes dados.

Ao realizar a ANOVA de uma via, evidenciou-se um efeito significativo do tipo de gás na média da tensão de referência [$F(2,67) = 102,8$; $p < 2 \times 10^{-16}$]. Os testes post-hoc de Duncan indicam diferenças estatisticamente significativas entre todos os gases testados: CO₂ e Ar ($p < 2 \times 10^{-16}$), Ar e Ar+CO₂ ($p < 2 \times 10^{-16}$) e CO₂ e Ar+CO₂ ($p = 8,7 \times 10^{-8}$). Os testes post-hoc de Tukey e Bonferroni corroboraram esses resultados, indicando diferenças significativas entre todos os pares de gases ($p < 2 \times 10^{-16}$ para Ar e Ar+CO₂, CO₂ e Ar, CO₂ e Ar+CO₂). Neste caso todos os testes mostram o mesmo, que os gases têm valores diferentes de tensão de referência, como apresentado no gráfico da Figura 17.

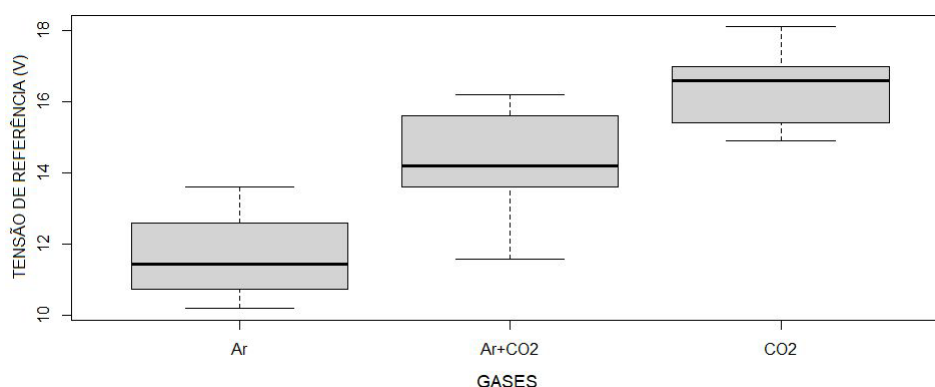


Figura 17. Boxplot dos valores de tensão de referência para os três gases.

Para avaliar o tempo de curto-circuito considerando os diferentes gases, foi feito o teste de Shapiro-Wilk, que indica que os dados de tempo de curto-circuito não seguem uma distribuição normal para nenhum dos gases analisados (Ar: $w = 0,7040$, $p = 1,137 \times 10^{-5}$; Ar+CO₂: $w = 0,8049$, $p = 0,0002746$; CO₂: $w = 0,8647$, $p = 0,0077078$). Os resultados do teste de Kruskal-Wallis indicaram que não há efeito significativo do tipo de gás na média do tempo de curto-circuito [$\chi^2(2) = 8,1325$; $p = 0,1714$], como é possível observar na Figura 18.

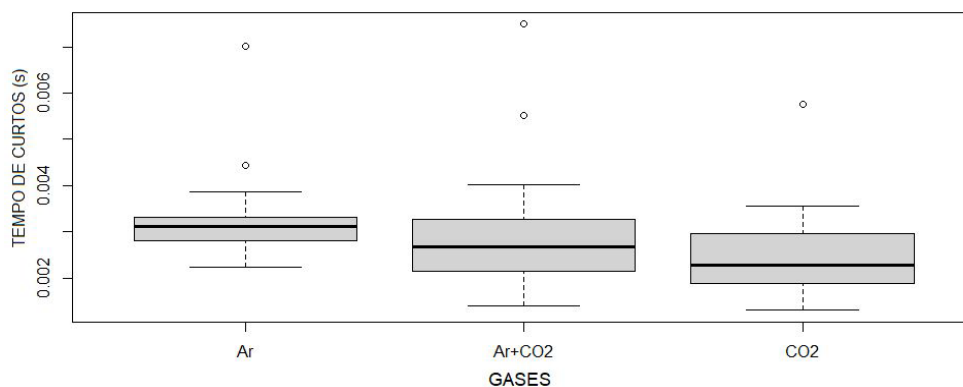


Figura 18. Boxplot dos valores de tempo de curto-circuito para os três gases.

A análise estatística referente ao tempo de arco aberto, considerando diferentes gases, foi realizada primeiramente com o teste de Shapiro-Wilk para avaliar a normalidade dos dados, mas apenas o CO₂ apresentou distribuição normal (Ar: $w = 0,8937$, $p = 0,01586$; Ar+CO₂: $w = 0,6997$, $p = 7,23 \times 10^{-6}$; CO₂: $w = 0,9358$, $p = 0,17947$). Ao aplicar o teste de Kruskal-Wallis, observou-se que não há um efeito significativo do tipo de gás na média do tempo de arco aberto [$\chi^2(2) = 3,634$; $p = 0,1625$], o que é possível perceber no gráfico da Figura 19.

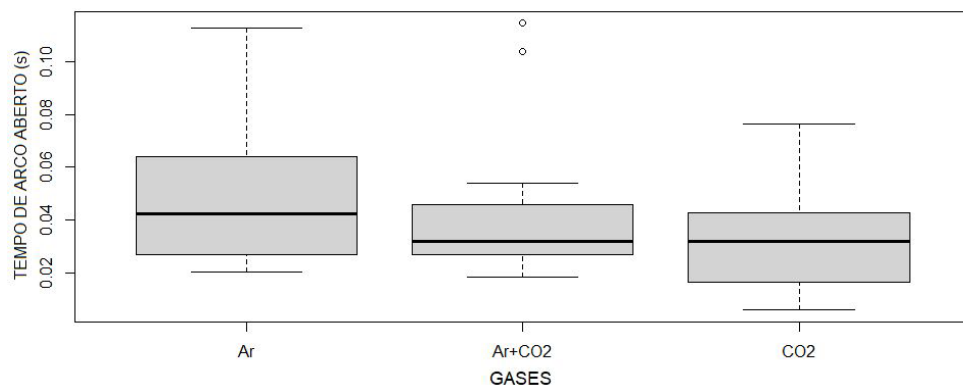


Figura 19. Boxplot dos valores de tempo de arco aberto para os três gases.

O teste de Shapiro-Wilk revelou que, entre os gases analisados, apenas o Ar apresentou distribuição normal para a tensão de arco aberto (Ar: $w = 0,9280$, $p = 0,08809$; Ar+CO₂: $w = 0,9070$, $p = 0,02615$; CO₂: $w = 0,9008$, $p = 0,03633$). Aplicando o teste de Kruskal-Wallis, observou-se um efeito significativo do tipo de gás na média da tensão de arco aberto [$\chi^2(2) = 54,317$; $p = 1,604 \times 10^{-12}$].

Os resultados do teste post-hoc Dunn indicaram diferenças estatisticamente significantes entre todos os grupos de gases analisados. Há diferenças entre CO₂ e Ar ($p = 4,4 \times 10^{-8}$), entre Ar+CO₂ e Ar ($p = 7,32 \times 10^{-5}$) e entre CO₂ e Ar+CO₂ ($p = 8,89 \times 10^{-8}$), como é possível observar no gráfico da Figura 20.

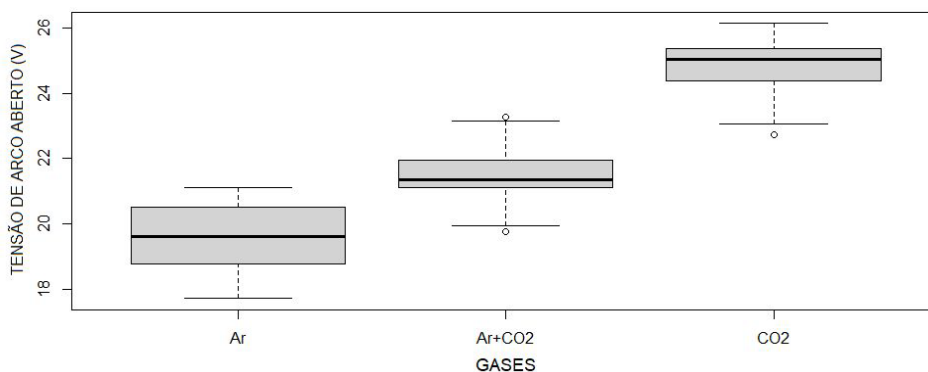


Figura 20. Boxplot dos valores de tensão de arco aberto para os três gases.

5.5. Séries temporais

O ARIMA e o ETS foram utilizados para criar modelos de séries temporais para prever o comportamento da tensão durante a soldagem por curto-circuito. Inicialmente foi feito um seasonal plot para tentar identificar possíveis sazonalidades nos dados, o que não foi verificado, Figura 21. Nota-se na Figura 21, duas faixas de valores para a tensão, o que é o esperado para a soldagem MIG/MAG operada no modo curto-circuito.

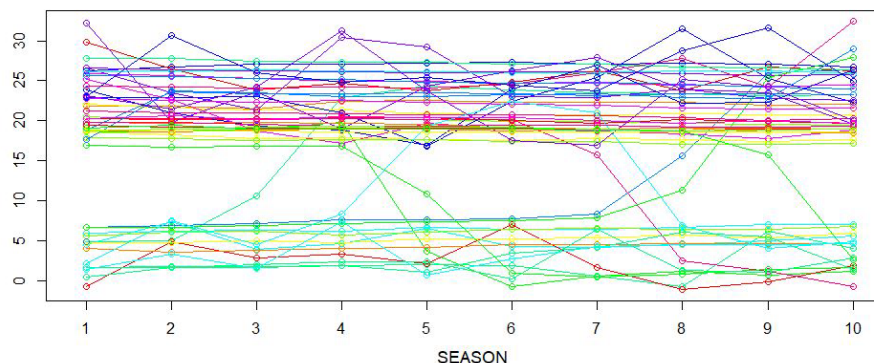


Figura 21. Season plot dos valores de tensão de soldagem.

Para o Ar+CO₂ foi utilizado um data frame com os 500 primeiros valores de tensão do experimento, com tensão de 19 V e taxa de subida da corrente de 19,63 A/ms. O data frame deve ser convertido em série temporal. Para isso deve ser escolhida uma data de início ($c(1,1)$, mês 1 do ano 1) e uma de fim ($c(500,1)$ mês 1 do ano 500), bem como a frequência ($frequency = 10$, número de meses). Com estas informações o data frame é transformado em uma série temporal, Figura 22.

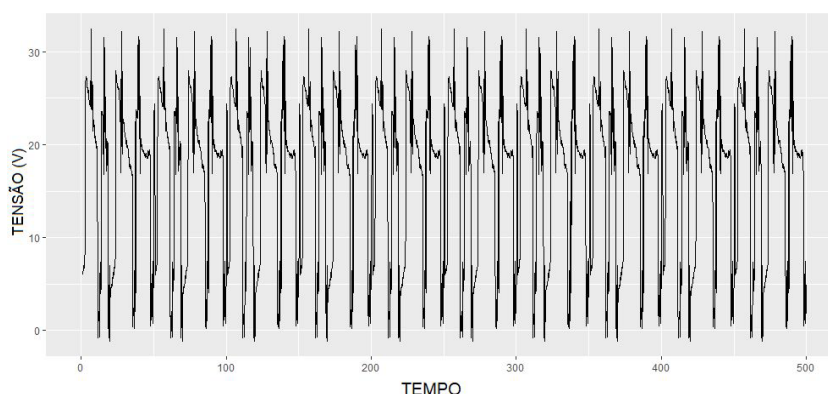


Figura 22. Gráfico dos valores de tensão de soldagem como série temporal.

Foi utilizada a função `auto.arima`, do pacote `forecast`, para determinar o melhor tipo de arima para os dados. Neste caso foi o $ARIMA(4,0,0)$, indicando que a série temporal original foi usada diretamente, sem diferenciação ($d = 0$), e que as últimas 4 observações foram usadas para prever a próxima. A sazonalidade ocorre em múltiplos de 10 e o modelo considera uma influência sazonal na série temporal que é modelada com uma média móvel sazonal de ordem 1.

É possível avaliar um modelo de previsão de uma série temporal a partir de alguns dados, como o Root Mean Squared Error ($RMSE = 2,829431$), que mede a precisão média das previsões, sendo que o valor ficou muito baixo para nosso modelo. Outra métrica importante é o Mean Absolute Percentage Error ($MAPE = 29,9582$), que calcula a média percentual dos erros em relação aos valores reais, o qual ficou muito alto. A partir destas métricas pode-se concluir que o modelo de previsão criado não ficou preciso.

A avaliação da qualidade do modelo é essencial para garantir a confiabilidade das previsões. Ao analisar o gráfico de resíduos, observa-se que a média se mantém constante ao longo do tempo, indicando uma boa captura das tendências pelo modelo. A variação dos resíduos é praticamente constante (exceto por algumas instâncias pontuais de inconsistência). A análise da função de autocorrelação dos erros revela a presença de pontos fora do intervalo de confiança de 95%, indicando correlações significativas que o modelo não conseguiu capturar, Figura 23.

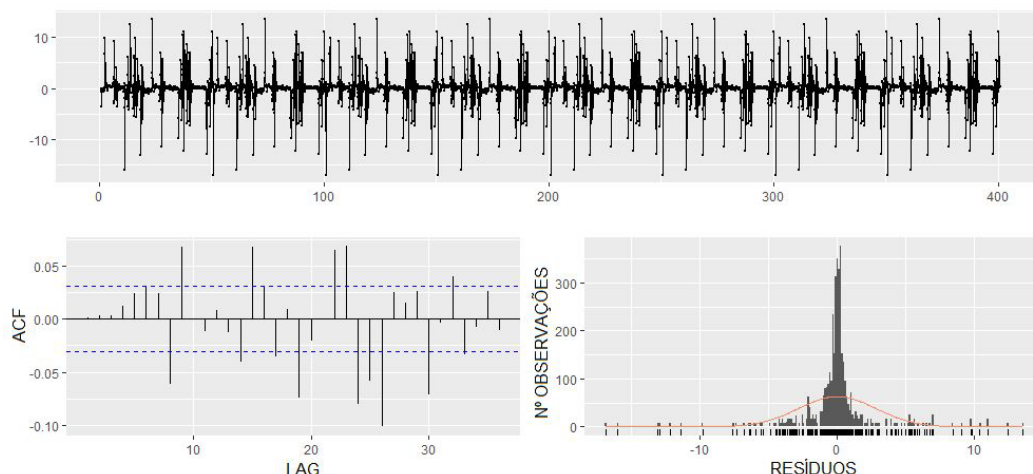


Figura 23. Gráfico dos resíduos do ARIMA, onde ACF é a função de autocorrelação, LAG são os diversos coeficientes de autocorrelação de tamanho k , e o número de observações é a variável y do dataset df.

Uma análise mais aprofundada revela que os resíduos não seguem uma distribuição normal. Isso é evidenciado pelo teste de Shapiro-Wilk, que produz um valor- p extremamente baixo ($p < 2.2 \times 10^{-16}$), indicando que os resíduos não se alinham com uma distribuição normal.

Foi criado um modelo de previsão de série temporal utilizando um modelo de suavização exponencial *ETS*. Neste caso foi o *ETS(A, N, A)*, se o erro é *A* (Aditivo), indica que o modelo assume que os erros são aditivos. Se a tendência é *N* (Nenhuma), sugere que não há componente de tendência no modelo e a série é considerada estacionária ao longo do tempo. Se a sazonalidade é *A* (Aditiva), a sazonalidade é modelada como uma série de adições (ou subtrações) à média.

Avaliando este modelo de predição pelas métricas anteriormente citadas tem-se que o Root Mean Squared Error ($RMSE = 2,892597$) tem um valor muito baixo para a precisão média das previsões. O Mean Absolute Percentage Error ($MAPE = 27,45801$) teve alto valor percentual em relação aos valores reais. A partir destas métricas pode-se concluir que o modelo de previsão criado não ficou preciso.

A avaliação da qualidade do modelo é fundamental para assegurar a confiabilidade das previsões. Ao examinar o gráfico de resíduos, nota-se que a média permanece estável ao longo do tempo, sugerindo que o modelo efetivamente captura as tendências. A variação dos resíduos é praticamente constante (exceto por algumas instâncias pontuais de inconsistência). A análise da função de autocorrelação dos erros revela a presença de pontos fora do intervalo de confiança de 95%, indicando correlações significativas que o modelo não conseguiu incorporar, Figura 24.

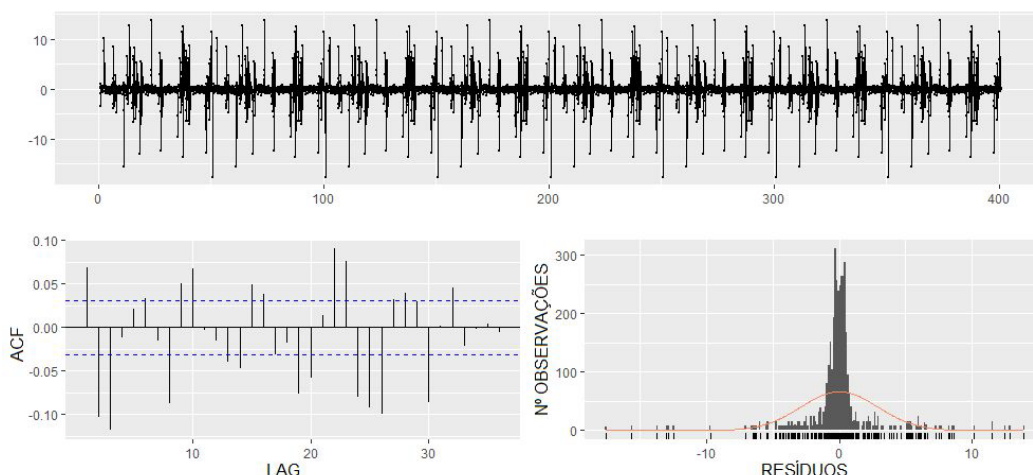


Figura 24. Gráfico dos resíduos do ETS, onde ACF é a função de autocorrelação, LAG são os diversos coeficientes de autocorrelação de tamanho k , e o número de observações é a variável y do dataset df.

Ao realizar uma investigação mais detalhada, observamos que os resíduos não exibem uma distribuição normal. Essa constatação é respaldada pelo teste de Shapiro-Wilk, o qual resulta em um valor- p extremamente reduzido ($p < 2,2 \times 10^{-16}$), sugerindo que os resíduos não aderem a uma distribuição normal.

É possível notar pela Figura 25 previsões muito ruins do comportamento da tensão durante a soldagem. Devido à natureza caótica da soldagem por curto-circuito, os modelos utilizados não foram capazes de produzir previsões precisas.

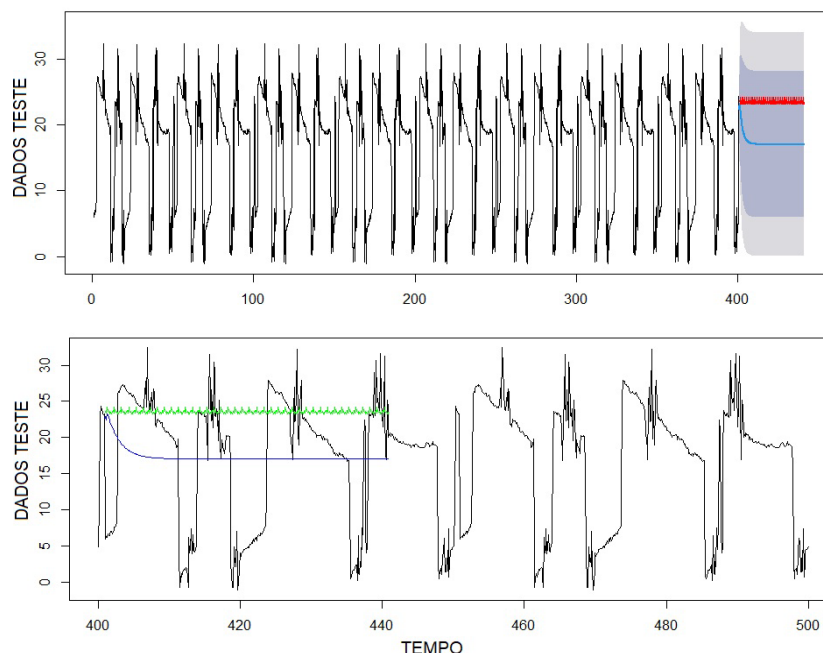


Figura 25. Gráficos dos dados e das previsões criadas pelo ARIMA (figura superior) e ETS (figura inferior).

6. Conclusões

Em um mundo cada vez mais orientado por dados, a utilização de métodos e modelos estatísticos é vital para tomar decisões e estratégias em diversos contextos. O teste de correlações desempenha um papel fundamental na comparação dos dados obtidos nos experimentos de soldagem MIG/MAG. Essa abordagem é essencial para uma análise abrangente, contribuindo para a compreensão da influência dos parâmetros de soldagem, na melhoria da qualidade do processo e na tomada de decisões informadas para cada aplicação.

Para os parâmetros, condições de soldagem, valores obtidos do oscilograma de tensão, e materiais utilizados no presente estudo, pode se sumarizar as seguintes conclusões:

- O comportamento dos valores extraídos dos dados de tensão e corrente de soldagem como o tempo de curto-circuito, tempo de arco aberto, tensão de curto-circuito e taxa de subida da corrente durante o curto-circuito não seguem uma distribuição normal. Apenas a tensão de arco aberto segue distribuição normal;
- A correlação entre os valores obtidos: tempo de curto-circuito e o tempo de arco aberto; tempo de curto-circuito e a tensão de arco aberto; tensão de arco aberto e a taxa de subida da corrente; tempo de arco aberto, indicam a falta de uma correlação significativa;
- A correlação entre os valores obtidos: tensão de curto-circuito; tempo de arco aberto e a taxa de subida da corrente; tensão de curto-circuito e tensão de arco aberto; tempo de curto-circuito e taxa de subida da corrente, indicam conflito entre os testes, ou falta de confiabilidade dos resultados;
- A correlação entre tempo de arco aberto e tensão de arco aberto teve significância estatística e resultados confiáveis;
- Foi possível observar na matriz de correlações que a correlação entre o tempo de arco aberto e o número de curtos e para o tempo de arco aberto e a taxa de subida da corrente apresentaram forte correlação para todos os gases;
- As correlações entre a taxa de subida da corrente e o número de curtos; o tempo de curto e a tensão de curto-circuito, assim como a correlação entre a tensão de curto-circuito e a tensão de referência, demonstraram menor significância para todos os gases;
- A avaliação da influência do tipo de gás na tensão de curto-circuito feita com o teste ANOVA de uma via mostra que existe um efeito significativo do tipo de gás sobre a média da tensão de curto-circuito. Mas os testes post hoc tiveram resultados conflitantes, com Duncan indicando diferença entre os gases CO₂ e Ar e entre Ar e Ar+CO₂ e os testes de Tukey e Bonferroni destacando apenas a diferença entre Ar+CO₂ e Ar;

- A avaliação da influência do tipo de gás na taxa de subida da corrente feita com o teste ANOVA de uma via não mostra efeito significativo do tipo de gás;
- A avaliação da influência do tipo de gás no número de curto-circuito feita com o teste ANOVA de uma via mostra que há um efeito significativo do tipo de gás em sua média. O teste post-hoc de Duncan revelou diferenças estatisticamente significativas entre os gases CO₂ e Ar e entre CO₂ e Ar+CO₂. Já os testes post-hoc de Tukey e Bonferroni apontaram que apenas as médias entre CO₂ e Ar são estatisticamente significantes;
- A avaliação da influência do tipo de gás na tensão de referência feita com o teste ANOVA de uma via mostra efeito significativo do tipo de gás na média da tensão de referência. Os testes post-hoc de Duncan indicaram diferenças estatisticamente significativas entre todos os gases utilizados e os testes post-hoc de Tukey e Bonferroni corroboraram esses resultados;
- A avaliação da influência do tipo de gás no tempo de curto-circuito feita com o teste de Kruskal-Wallis mostra que não há efeito significativo do tipo de gás na média do tempo de curto-circuito;
- A avaliação da influência do tipo de gás no tempo de arco aberto feita com o teste de Kruskal-Wallis mostra que não há efeito significativo do tipo de gás na média do tempo de arco aberto;
- A avaliação da influência do tipo de gás na tensão de arco aberto feita com o teste de Kruskal-Wallis mostra que há efeito significativo do tipo de gás na média. O teste post-hoc de Dunn indicou diferenças estatisticamente significantes entre todos os grupos de gases;
- A análise por série temporal utilizando o método ARIMA foi incapaz de gerar um modelo que previsse o comportamento da tensão durante o processo de soldagem;
- A análise por série temporal utilizando o método ETS foi incapaz de gerar um modelo que previsse o comportamento da tensão durante o processo de soldagem.

Contribuição dos autores

WRN: realização dos ensaios de impacto, medições, tratamento e análise dos resultados, escrita original do trabalho. JEM: idealização e proposição do tema da pesquisa, metodologia de desenvolvimento do trabalho, supervisão, validação, revisão final do trabalho. DS e DFF: obtenção dos dados de soldagem. CGR: validação, revisão e escrita final do trabalho.

Referências

- [1] Scotti A, Ponomarev V. Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. São Paulo: Artliber Editora; 2008.
- [2] Souza D, Rossi ML, Keocheguerians F, Nascimento VCD, Vilarinho LO, Scotti A. Influência da regulagem de parâmetros de soldagem sobre a estabilidade do processo MIG/MAG operando em curto-circuito. Soldagem e Inspeção. 2011;16(1):22-32. <http://doi.org/10.1590/S0104-92242011000100004>.
- [3] Meneses VAD. Efeito da estabilidade da transferência metálica (respingos) na soldagem MIG/MAG por curto-circuito sobre a geração de fumos e gases [tese de doutorado]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; 2013 [acesso em 3 dez. 2024]. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14742>
- [4] Costa TF, Benedetti EB Fo, Arevalo HDH, Vilarinho LO. Avaliação de processos mig/mag curto-circuito convencional e controlado para a soldagem de dutos de aço carbono em passe único. Soldagem e Inspeção. 2012;17(4):356-368. <http://doi.org/10.1590/S0104-92242012000400010>.
- [5] Alfaro SCA, Chawla K, Norrish J. Computer based data acquisition for welding research and production. Journal of Materials Processing Technology. 1995;53(1-2):1-13. [http://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)01956-F](http://doi.org/10.1016/0924-0136(95)01956-F).
- [6] Camargo LG, Drechsler MF, Santos CM, Cunha TVD. Proposta e análise de dispositivo para otimização do destacamento da gota na soldagem MIG/MAG. Soldagem e Inspeção. 2016;21(1):83-91. <http://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2101.08>.
- [7] Jorge VL, Scotti FM, Reis RP, Scotti A. Wire feed pulsation as a means of inducing surface tension metal transfer in gas metal arc welding. Journal of Manufacturing Processes. 2021;62:655-669. <http://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.072>.
- [8] Fernandes DB, Menezes LC Jr, Vilarinho LO, Scotti A. Ensaio para medição de nível e alcance de respingos em soldagem mig/mag. Soldagem e Inspeção. 2010;15(2):150-155. <http://doi.org/10.1590/S0104-92242010000200009>.
- [9] Tatagiba LCS, Gonçalves RB, Paranhos R. Tendências no desenvolvimento de gases de proteção utilizados na soldagem mig/mag. Soldagem e Inspeção. 2012;17(3):218-228. <http://doi.org/10.1590/S0104-92242012000300006>.
- [10] Pessoa ECP. Estudo da variação da porosidade ao longo do cordão em soldas subaquáticas molhadas [tese de doutorado]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2007.

- [11] Guan ZQ, Zhang HX, Liu XG, Babkin A, Chang YL. Effect of magnetic field frequency on the shape of GMAW welding arc and weld microstructure properties. *Materials Research Express*. 2019;6(8):0865e5. <http://doi.org/10.1088/2053-1591/ab2572>.
- [12] Hirata EK, Beltzac LF, Okimoto PC, Scotti A. Influência da corrente sobre o rendimento bruto de fusão em soldagem mig/mag. *Soldagem e Inspeção*. 2014;19(2):159-167. <http://doi.org/10.1590/0104-9224/SI1902.08>.
- [13] Bohrer CB. Influência do gás de proteção sobre o aporte de energia na soldagem mig/mag de aços carbono [monografia]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2013.
- [14] Mello HF. Análise da influência dos gases de proteção no processo de soldagem mig/mag sobre distorções de chapas de aço [monografia]. Joinville: Universidade Federal de Santa Catarina; 2015.
- [15] Schafranski LL. Efeitos do hidrogênio e dióxido de carbono em misturas à base de argônio e da bitola de arame quanto aos aspectos de produtividade e qualidade de soldas realizadas pelo processo mig/mag [dissertação de mestrado]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 2016 [acesso em 3 dez. 2024]. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/176721?show=full>
- [16] Dutra JC. Mig/mag – transferência metálica por curto-circuito – fontes de soldagem versus gases do arco. *Soldagem e Inspeção*. 2008;13:19-24.
- [17] Quintino L, Liskevich O, Vilarinho L, Scotti A. Heat input in full penetration welds in gas metal arc welding (gmaW). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;68(9-12):2833-2840. <http://doi.org/10.1007/s00170-013-4862-8>.
- [18] Gomes J, Costa S, Paiva A, Balestrassi P. Mathematical modeling of weld bead geometry, quality, and productivity for stainless steel claddings deposited by fcaw. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2012;21(9):1862-1872. <http://doi.org/10.1007/s11665-011-0103-1>.
- [19] Correia DS, Gonçalves CV, Cunha SS Jr, Ferraresi VA. Comparison between genetic algorithms and response surface methodology in gmaW welding optimization. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005;160(1):70-76. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.243>.
- [20] Uller JC. A influência da indutância na geometria do cordão de solda no processo mig/mag [monografia]. Jaraguá do Sul: Instituto Federal de Santa Catarina; 2013 [acesso em 3 dez. 2024]. Disponível em: <https://repositorio.ifsc.edu.br/handle/123456789/257>
- [21] Souza D. Levantamento de mapas operacionais de transferência metálica para soldagem mig/mag de aço ao carbono na posição plana [dissertação de mestrado]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; 2010.
- [22] Rezende GMCD, Liskévych O, Vilarinho LO, Scotti A. Um critério para determinar a regulação da tensão em soldagem MIG/MAG por curto-circuito. *Soldagem e Inspeção*. 2011;16(2):98-103. <http://doi.org/10.1590/S0104-92242011000200002>.
- [23] Niz WR. Influência da taxa de subida da corrente na regularidade do processo mig/mag por curto-circuito [monografia]. Goiânia: Instituto Federal de Goiás; 2023.
- [24] Morettin PA, Singer JM. Estatística e ciência de dados. São Paulo: IME USP; 2021.
- [25] Montgomery DC. Design and analysis of experiments. New York: John Wiley & Sons; 2017.
- [26] Daszykowski M, Kaczmarek K, Heyden YV, Walczak B. Robust statistics in data analysis – a review: basic concepts. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2007;85(2):203-219. <http://doi.org/10.1016/j.chemolab.2006.06.016>.
- [27] Razali NM, Wah YB. Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorovsmirnov, lilliefors and anderson-darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*. 2011;2(1):21-33.
- [28] Ariyo AA, Adewumi AO, Ayo CK. Stock price prediction using the arima model, in 2014 UKSim-AMSS 16th International Conference on Computer Modelling and Simulation. *IEEE*. 2014;1(2):106-112.
- [29] Khan S, Alghulaikh H. Arima model for accurate time series stocks forecasting. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2020;11(7):0110765. <http://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110765>.
- [30] Pinheiro A, Graciano RLG, Severo DL. Tendência das séries temporais de precipitação da região sul do brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 2013;28(3):281-290. <http://doi.org/10.1590/S0102-77862013000300005>.
- [31] Bressan AA. Tomada de decisão em futuros agropecuários com modelos de previsão de séries temporais. *RAE Eletrônica*. 2007;3:9.
- [32] Ballini R, Soares S, Andrade MG. Previsão de vazões médias mensais usando redes neurais nebulosas. *Revista Controle & Automação*. 2003;14(3):286-297. <http://doi.org/10.1590/S0103-17592003000300008>.
- [33] Antunes JLF, Cardoso MRA. Uso da análise de séries temporais em estudos epidemiológicos. *Epidemiologia e Serviços de Saúde: Revista do Sistema Unico de Saúde do Brasil*. 2015;24(3):565-576. <http://doi.org/10.5123/S1679-49742015000300024>.
- [34] Newbold P. Arima model building and the time series analysis approach to forecasting. *Journal of Forecasting*. 1983;2(1):23-35. <http://doi.org/10.1002/for.3980020104>.
- [35] Tseng F-M, Yu H-C, Tzeng G-H. Combining neural network model with seasonal time series arima model. *Technological Forecasting and Social Change*. 2002;69(1):71-87. [http://doi.org/10.1016/S0040-1625\(00\)00113-X](http://doi.org/10.1016/S0040-1625(00)00113-X).

- [36] Cézar GM, Junior SVM, Sousa MA, Rodrigues CG. Agricultural commodity price prediction by using artificial neural networks. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2024
- [37] American Welding Society. *Structural Welding Code-Steel*. 17th ed. Doral: AWS; 2000 [acesso em 3 dez. 2024]. Disponível em: <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/003/aws.d1.1.2000.pdf>