

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Curso de Especialização em Matemática

**Avaliação de soldagem MIG/MAG
por curto-circuito utilizando
ferramentas computacionais e
modelagem estatística**

por

Weslei Rodrigues Niz

**Goiânia
2024**

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☒ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☐ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Weslei Rodrigues Niz

Matrícula: 20221011160157

Título do Trabalho: Avaliação de soldagem MIG/MAG por curto-circuito utilizando ferramentas computacionais e modelagem estatística

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no ReDi/IFG: __/__/__

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☐ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☐ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 21 / 10 / 2024.
Local Data

Documento assinado digitalmente
 WESLEI RODRIGUES NIZ
Data: 21/10/2024 16:27:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Weslei Rodrigues Niz

Avaliação de soldagem MIG/MAG por curto-circuito utilizando ferramentas computacionais e modelagem estatística

Monografia apresentada ao Corpo Docente do Curso de Pós-Graduação lato sensu em Matemática - Departamento de Áreas Acadêmicas II - IFG/Câmpus Goiânia, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Matemática.

Área de concentração: Estatística, análise computacional
Orientador(a): Prof. Dr. José Elmo de Menezes

Goiânia
2024

N655a Niz, Weslei Rodrigues.

Avaliação de soldagem MIG/MAG por curto-circuito utilizando ferramentas computacionais e modelagem estatística / Weslei Rodrigues Niz. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2024.
64 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. José Elmo de Menezes.

TCC (Monografia) – Especialização em Matemática, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

1. Matemática - ensino. 2. Geogebra. 3. Aprendizagem significativa. I. Menezes, José Elmo de (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. III. Título.

CDD 510.7

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Karol Almeida da Silva CRB1/ 2.740
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

Avaliação de soldagem MIG/MAG por curto-circuito utilizando ferramentas computacionais e modelagem estatística

por

Weslei Rodrigues Niz

Monografia apresentada ao Corpo Docente do Curso de Especialização em Matemática do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Goiânia, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Matemática.

Área de concentração: Matemática Aplicada

Orientador: Prof. Dr. José Elmo de Menezes

Monografia defendida e aprovada, em 14 de outubro de 2024, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

(assinado eletronicamente)

Prof. Dr. José Elmo de Menezes (Presidente da Banca/ IFG/Câmpus Goiânia)

(assinado eletronicamente)

Prof. Dr. Julio César Saavedra Vásquez (IFG/Câmpus Goiânia)

(assinado eletronicamente)

Prof. Dr. Elias Calixto Carrijo (IFG/Câmpus Goiânia)

Documento assinado eletronicamente por:

- Elias Calixto Carrijo, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 14/10/2024 17:35:30.
- Julio Cesar Saavedra Vasquez, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 14/10/2024 17:35:08.
- Jose Elmo de Menezes, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 14/10/2024 17:34:23.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 20/09/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 566546
Código de Autenticação: be6bb1094b



Dedicatória

Dedico esse trabalho à todos os meus amigos e familiares.

Agradecimentos

Agradeço a toda minha família pelo carinho e apoio.

Agradeço ao corpo docente do curso de pós-graduação lato sensu em Matemática.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás.

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% gás carbônico e 100% gás carbônico, 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. Durante o desenvolvimento do trabalho foi feita a aplicação de testes de correlação (Pearson, Spearman, Kendall) além disso foram realizadas uma série de avaliações foi realizada para analisar a qualidade de modelos, incluindo a aplicação de testes de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade dos resíduos. Foi possível criar uma matriz de correlações com os parâmetros e gases testados. As correlações entre o tempo de arco aberto vs o número de curtos e o tempo de arco aberto vs a taxa de subida da corrente foram fortes para todos os gases. As correlações entre a taxa de subida da corrente vs o número de curtos, o tempo de curto vs a tensão de curto-circuito, assim como a correlação entre a tensão de curto circuito vs 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-chaves: testes de correlação, matriz de correlações e série temporal.

Abstract

In this work, data from MIG/MAG welding experiments carried out in short-circuit operating mode using three gases—100% argon, argon with 25% carbon dioxide, and 100% carbon dioxide—were analyzed, enabling comprehensive analysis 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. During the development of this study, correlation tests (Pearson, Spearman, Kendall) were applied, along with a series of evaluations to assess the quality of models, including the application of Shapiro-Wilk tests to verify the normality of residuals. A correlation matrix was created for the tested parameters and gases. Strong correlations were found between open arc time vs. number of shorts and open arc time vs. current rise rate for all gases. The correlations between current rise rate vs. number of shorts, short-circuit time vs. short-circuit voltage, and short-circuit voltage vs. reference voltage showed lower significance for all gases. Regarding time series analysis, ARIMA and ETS models were fitted and evaluated with specific metrics, indicating the need for model improvements to increase forecast accuracy.

Keywords: Correlation tests, correlation matrix and time series.

Lista de Figuras

2.1	Esquema da montagem da fonte de soldagem com alimentador de arame, carretel de arame, motor de alimentação, gás de proteção, tocha e peça.	16
2.2	Oscilogramas típicos de tensão e de corrente durante a transferência por curto-circuito em função do comportamento da gota em crescimento e destacamento.	17
3.1	Histograma dos valores de tensão de soldagem divididos em 15 intervalos.	35
4.1	Gráfico de dispersão para tensão de curto circuito e tempo de arco aberto.	38
4.2	Gráfico de dispersão para tempo de arco aberto e taxa de subida da corrente.	38
4.3	Gráfico de dispersão para tensão de curto circuito e tensão de arco aberto.	39
4.4	Gráfico de resíduos, resíduos padronizados e de dispersão para tempo de curto circuito e tensão de curto circuito.	40
4.5	Gráfico de resíduos, resíduos padronizados e de dispersão para tempo de curto circuito e tensão de curto circuito.	41
4.6	Gráfico de resíduos, resíduos padronizados e de dispersão para tempo de arco aberto e tensão de arco aberto.	42
4.7	Matriz de correlação com o grau de significância para o argônio. . . .	43
4.8	Matriz de correlação com o grau de significância para o argônio mais gás carbônico.	44
4.9	Matriz de correlação com o grau de significância para o gás carbônico.	45

4.10	<i>Box plot</i> dos valores de tensão de curto circuito para os três gases. . .	47
4.11	<i>Box plot</i> dos valores de taxa de subida da corrente durante o curto circuito para os três gases.	48
4.12	<i>Box plot</i> dos valores de números de curto circuito para os três gases. .	49
4.13	<i>Box plot</i> dos valores de tensão de referência para os três gases. . . .	50
4.14	<i>Box plot</i> dos valores de tempo de curto circuito para os três gases. . .	51
4.15	<i>Box plot</i> dos valores de tempo de arco aberto para os três gases. . . .	52
4.16	<i>Box plot</i> dos valores de tensão de arco aberto para os três gases. . . .	53
4.17	<i>Seasonal plot</i> dos valores de tensão de soldagem.	54
4.18	Gráfico dos valores de tensão de soldagem como série temporal. . . .	55
4.19	Gráfico dos resíduos do ARIMA criado.	56
4.20	Gráfico dos resíduos do ETS criado.	57
4.21	Gráfico dos dados e das previsões criadas pelo ARIMA e ETS. . . .	58

Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros de soldagem utilizados nos testes.(x representa ausência de experimento)	34
-----	---	----

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	Processo MIG/MAG	15
2.1.1	Transferência por curto-circuito	15
2.1.2	Gases de proteção	18
2.1.3	Tensão e corrente de soldagem	20
2.1.4	Indutância	21
2.1.5	Estabilidade do processo	22
2.2	Métodos estatísticos	24
2.2.1	Testes de Normalidade	24
2.2.2	Correlação de Pearson, Spearman e Kendal	26
2.2.3	ANOVA e Kruskal-Wallis	29
2.2.4	PostHoc de Duncan, Tukey e Bonferroni	30
2.2.5	Séries temporais	32
3	Materiais e métodos	33
3.1	Materiais	33
3.2	Métodos	33
4	Resultados e discussões	36
4.1	Teste de normalidade	36
4.2	Teste de correlação dos dados	37
4.3	Matriz de correlações	42
4.4	ANOVA, Kruskal-Wallis e <i>Post-hoc</i>	46

4.5	Séries temporais	53
5	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	61

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.

Dentre os diferentes modos de operação, o de "curto-circuito" é destacado neste contexto. Nesse modo, 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 (Americo; Vladmir, 2008; Souza et al., 2011). 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 (Meneses et al., 2013; Souza et al., 2011).

O planejamento de experimentos envolve a concepção cuidadosa de experimentos para coletar dados relevantes permitindo a análise estatística eficaz dos resultados. Um planejamento de experimentos 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 (Gama, 2015). Algumas aplicações típicas do planejamento de experimentos são a seleção de parâmetros de projeto, controle de qualidade e pesquisa acadêmica (Alfaro; Chawla; Norrish, 1995).

Séries temporais são conjuntos de dados organizados em ordem cronológica, geralmente com intervalos uniformes entre as observações. Elas desempenham um papel fundamental na análise estatística e na tomada de decisões em diversas áreas, como finanças, meteorologia, economia, engenharia e epidemiologia (Pinheiro; Graciano; Severo, 2013; Bressan, 2007; Ballini, 2000; Antunes; Cardoso, 2015). A análise de séries temporais envolve a exploração de padrões, tendências e variações

ao longo do tempo, permitindo a previsão de comportamentos futuros com base em dados passados. Além disso, as séries temporais também são essenciais para identificar eventos incomuns, detectar sazonalidades e avaliar o impacto de intervenções ou políticas ao longo do tempo. Em um mundo cada vez mais orientado por dados, a compreensão das séries temporais é vital para tomar decisões informadas e estratégicas em diversos contextos.

Existem rotinas computacionais implementadas para medir a regularidade da soldagem, o método mais conhecido é o Critério Laprosolda de Regularidade de Transferência (SOUZA, 2009; Rezende et al., 2011). O objetivo desse trabalho foi avaliar através de rotinas computacionais e testes estatísticos os fatores que afetam a regularidade da soldagem MIG/MAG no modo curto-circuito, Utilizando programas implementados em linguagem R.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O presente capítulo introduz o tópico soldagem MIG/MAG por curto circuito. São explicados conceitos como 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.

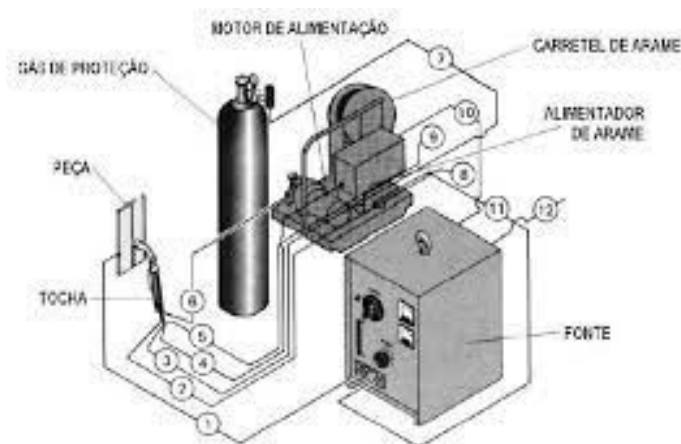
2.1 PROCESSO MIG/MAG

O processo de soldagem MIG/MAG ou GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) 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 incluem 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 notável pela sua versatilidade e facilidade de implementação em 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.

2.1.1 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, conforme mencionado por Scotti e Ponomarev (Americo;

Figura 2.1: Esquema da montagem da fonte de soldagem com alimentador de arame, carretel de arame, motor de alimentação, gás de proteção, tocha e peça.



Fonte : (Americo; Vladmir, 2008)

Vladmir, 2008).

No processo de soldagem por curto-circuito, a etapa inicial é o crescimento da gota na ponta do arame. Após o rompimento do curto-circuito, o tamanho do arco aumenta rapidamente. Conforme mencionado por Scotti e Ponomarev (Americo; Vladmir, 2008), dependendo das configurações de tensão de soldagem e indutância, o arco pode se estender o suficiente para permitir, ocasionalmente, a passagem de gotas em voo livre.

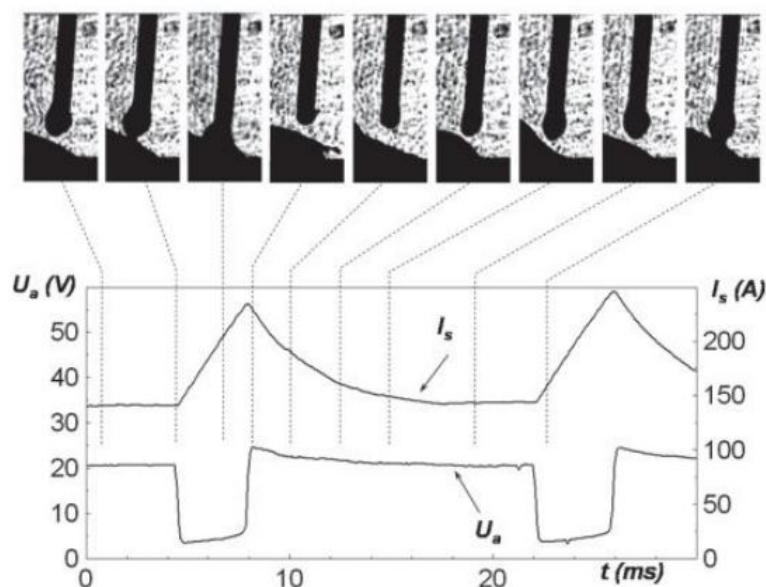
Após o contato da gota com a poça de fusão, a tensão diminui abruptamente e a corrente aumenta. Neste momento, a força predominante sobre a gota é a tensão superficial, junto com o efeito "*Pinch*", resultante das componentes da força eletromagnética. Esse efeito tende a separar o elemento de maior seção transversal do de menor seção transversal (Americo; Vladmir, 2008). A componente radial da força eletromagnética busca comprimir a área de contato, enquanto a componente axial empurra a gota para cima, atuando contra a transferência; no entanto, essa última componente é menos intensa (Camargo et al., 2016).

A gota começa a ser transferida por tensão superficial e a ponte formada entre a gota e a poça começa a se romper no final do curto-circuito. Com o aumento da corrente e a diminuição da seção transversal, o efeito "*Pinch*" também aumenta (Camargo et al., 2016), facilitando a transferência da gota para a poça. Essa alta corrente em uma seção transversal pequena resulta em um aquecimento repentino que contribui para o rompimento da gota. Processos de soldagem controlados, como

o CMT (*Cold Metal Transfer*) e o RMD (*Regular Metal Deposition*), entre outros, são amplamente utilizados por preservarem as características de uma solda por curto-circuito e reduzirem os inconvenientes de um processo de soldagem convencional, como a alta geração de respingos, conforme demonstrado por Costa et al. (Costa et al., 2012).

No ponto em que a corrente atinge seu valor máximo, ocorre o rompimento da ponte metálica e uma queda na corrente. Esse rompimento, em casos de baixa indutância, pode ser violento, resultando em uma liberação significativa de respingos (Souza et al., 2011). Se a indutância for excessivamente alta, a gota é menos afetada pelas forças que causam a separação, podendo resultar na imersão do arame na poça de fusão e interrompendo o processo de soldagem. É essencial encontrar um equilíbrio no valor da indutância para garantir a soldagem e minimizar respingos (Camargo et al., 2016; Jorge et al., 2021). Após a formação do arco, a tensão e corrente retornam aos valores normais e inicia-se a formação de uma nova gota de solda com o arco aberto, como mostrado na figura 2.2. Indutância é a propriedade de um circuito elétrico de resistir a mudanças na corrente elétrica, e a taxa de crescimento da corrente é medida em A/ms.

Figura 2.2: Oscilogramas típicos de tensão e de corrente durante a transferência por curto-circuito em função do comportamento da gota em crescimento e destacamento.



Fonte : (Americo; Vladmir, 2008)

2.1.2 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 (Fernandes et al., 2010). 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.

A capacidade de um sistema para proteger a poça de soldagem contra os gases da atmosfera é conhecida como eficiência de proteção. Essa característica depende não apenas do gás utilizado, mas também do fluxo e do bocal de soldagem. Como uma regra prática, a vazão é tipicamente medida em litros por minuto e é considerada 10 vezes o diâmetro do arame. O fluxo adequado varia de 10 a 16 l/min, com o valor mais elevado sendo preferível para correntes mais altas. O uso de valores acima dos mencionados pode resultar em turbulência no fluxo de gás, o que deve ser evitado para não comprometer a eficiência da solda e evitar a inclusão de elementos contaminantes (Americo; Vladmir, 2008).

Gases de proteção são essenciais para preservar a poça e as gotas de metal líquido contra elementos prejudiciais presentes no ambiente, como o nitrogênio, o componente mais abundante na atmosfera. Em aços de baixa liga e ligas de alumínio, nitretos, que são elementos fragilizantes, são formados (Tatagiba; Gonçalves; Paranhos, 2012). O oxigênio demonstra alta reatividade com os componentes presentes no metal base. Aços carbonos têm uma propensão significativa para se combinar com o oxigênio e formar bolhas de CO e CO₂. Se essas bolhas ficarem aprisionadas no cordão de solda após a solidificação, elas podem resultar em porosidades (Pessoa, 2007). Com outros elementos presentes nas ligas de aço, o oxigênio forma óxidos sólidos que podem atuar como nucleadores de microestruturas, desejáveis ou não, ou serem pontos de fragilização (Pessoa, 2007). Embora em menor quantidade no ar, o hidrogênio também pode levar à formação de poros em alumínio e pode ficar aprisionado, causando tensões em aços devido à sua alta solubilidade nos metais quando em estado líquido.

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 o CO₂, O₂ os mais utilizados.

Uma propriedade crucial do gás na soldagem é a sua densidade em relação à

densidade atmosférica. Gases ou misturas mais densas têm maior eficácia na proteção da solda realizada na posição plana, exigindo uma vazão mais elevada para gases de menor densidade, como o hélio. No entanto, essa condição se inverte para soldagens realizadas fora da posição plana, como na soldagem em posição sobre cabeça, onde uma maior eficiência de proteção é obtida com gases de menor densidade. Nas posições horizontais e verticais, a densidade não favorece a proteção, portanto, é recomendado aumentar ligeiramente a vazão acima do nível recomendado (Tatagiba; Gonçalves; Paranhos, 2012).

A estabilidade do arco é influenciada pelos gases de proteção e está diretamente relacionada às suas propriedades físico-químicas. As propriedades essenciais incluem a condutividade térmica, o potencial de oxidação e o potencial de ionização. O potencial de ionização representa a energia necessária para remover um ou mais elétrons da camada de valência de um átomo, resultando em sua ionização; um gás ionizado conduz eletricidade. Essa propriedade impacta tanto na abertura do arco quanto na sua estabilidade (Guan et al., 2019). O gás argônio, com um potencial de ionização mais baixo, demonstra uma maior facilidade na abertura do arco e uma estabilidade superior em comparação ao hélio, que possui um potencial de ionização mais elevado.

Os gases de proteção são compostos por moléculas de dois ou mais átomos, como CO_2 , O_2 e H_2 , que se dissociam em seus componentes atômicos devido às altas temperaturas antes de serem ionizados. Esse processo consome mais energia do que os gases monoatômicos. Durante o contato dos gases de proteção com a poça durante a soldagem, ocorre a recomposição e liberação de energia nesse ponto, afetando a formação do cordão (Hirata et al., 2014).

Uma alta capacidade de troca de calor favorece a fusão na poça, com uma maior transferência de calor para o meio ou para a chapa a ser soldada. Gases como He, CO_2 e H_2 possuem uma maior capacidade de conduzir calor. Consequentemente, quanto maior for a capacidade de troca de calor, maior será a tensão necessária para a manutenção do arco (Bohrer, 2013).

Um alto poder de oxidação é prejudicial para ligas de metais reativos durante a soldagem (Tatagiba; Gonçalves; Paranhos, 2012), levando à utilização de gases inertes como o argônio ou hélio. A presença de uma camada de óxidos sobre a poça é essencial para a estabilidade do arco (Americo; Vladimir, 2008). Durante a soldagem, metais reativos sempre possuem essa camada de óxidos, o que não afeta a estabilidade. Em contraste, metais menos reativos, como os aços, requerem gases ativos para obter arcos estáveis. Os gases H_2 e N_2 atuam como gases inertes devido

à ação redutora de seus íons.

A reatividade dos gases de proteção pode resultar em porosidades e fragilização na solda, semelhante ao efeito observado na soldagem realizada com proteção insuficiente, embora em uma escala menor, pois as concentrações dos gases reativos podem ser controladas. Os gases oxidantes têm potencial para reagir com os elementos das ligas metálicas durante a soldagem, o que pode levar a perdas significativas e influenciar a formação de escórias, a taxa de emissão de fumos e a fluidez da poça de fusão (Mello et al., 2015).

É comum o uso de eletrodos contendo elementos antioxidantes para realizar soldas com gases oxidantes. Quando há maiores teores de O_2 e CO_2 no gás de proteção, a quantidade de desoxidante no arame deve ser aumentada. Consequentemente, quanto maior for a quantidade de elemento desoxidante presente no arame (ou o potencial de oxidação do gás), maior será a quantidade de fumos gerados durante o processo de soldagem (Mello et al., 2015).

O potencial de oxidação do gás também pode impactar o formato do cordão de solda, alterando a capacidade do metal fundido de se espalhar e se aderir ao meio ao seu redor. Com um potencial de oxidação menor, a molhabilidade diminui, resultando em cordões de solda mais irregulares e convexos (Schafranski et al., 2016).

Na transferência por curto-circuito, o gás de proteção pode afetar o tamanho das gotas e a duração do curto-circuito, o que consequentemente modifica a estabilidade do processo. Segundo Dutra (Dutra et al., 2008), para alcançar as melhores características de soldagem por curto-circuito, é crucial considerar o gás utilizado ao ajustar os parâmetros da fonte.

2.1.3 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 (Quintino et al., 2013). Desvios em qualquer um desses parâmetros além dos limites desejados podem resultar em não conformidades na solda.

Entretanto, 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 (na soldagem com fontes tradicionais de tipo tensão constante,

onde a variação da tensão afeta o tamanho do arco e a corrente de soldagem está relacionada com a velocidade de alimentação do arame), exercem influência sobre a maioria das características peculiares do processo. Isso se torna evidente ao observar seus comportamentos ao longo do tempo nas curvas de tensão e corrente (Quintino et al., 2013).

Cada modo de operação distinto no processo de soldagem MIG/MAG exhibe curvas características distintas 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 mesmo da qualidade esperada do cordão de solda (Gomes et al., 2012). A atratividade da análise estatística da tensão e da corrente de soldagem se deve não apenas à sua importância fundamental no processo de soldagem, mas também à facilidade de medição dessas variáveis (Correia et al., 2005).

Para obter tais informações, é necessário analisar as curvas por meio da determinação de índices específicos, que se baseiam nos sinais elétricos gerados. 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 estudo, os oscilogramas de corrente e tensão de soldagem serão empregados para identificar a estabilidade da soldagem MIG/MAG por curto-circuito.

2.1.4 INDUTÂNCIA

A indutância é uma propriedade presente em circuitos que contêm um indutor ou um elemento de funcionamento similar. Sua função é criar resistência à variação da corrente. Um indutor é um componente elétrico capaz de armazenar energia na forma de campo magnético. 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 grandemente influenciado por certas características do equipamento, sendo a indutância a mais crucial entre elas (Uller, 2013; Schafranski et al., 2016). No processo MIG/MAG operando no modo de curto-circuito, essa propriedade é de extrema importância, pois uma rápida elevação da corrente afeta diretamente o efeito "*Pinch*". Um aumento mais acentuado na corrente resulta no rompimento abrupto do cordão de solda, com uma maior geração

de respingos (Souza et al., 2011).

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. Durante o processo de soldagem, a determinação da indutância real é inviável, uma vez que o ajuste na fonte é um dos fatores que altera a indutância, e diversas condições de soldagem também exercem influência na indutância real (Americo; Vladimir, 2008; Schafranski et al., 2016).

Souza (Souza et al., 2010) estabelece uma relação entre o efeito indutivo e a posição de ajuste da indutância em duas fontes distintas, com escalas de regulação diferentes. Fica evidente que não apenas a taxa de subida da corrente varia para uma mesma configuração, mas também o gradiente de variação da corrente ao longo do tempo. Isso demonstra que a indutância real não é exclusivamente determinada pelo ajuste na fonte. Essa perspectiva é reforçada por Souza (Souza et al., 2011), enfatizando que a referência mais apropriada para a indutância de um equipamento é o termo "efeito indutivo", juntamente com as taxas de crescimento e decréscimo da corrente, pois a indutância do sistema não depende apenas da fonte, mas também do arco.

2.1.5 ESTABILIDADE DO PROCESSO

Os curtos-circuitos normalmente possuem uma natureza aleatória, o que pode ser facilmente identificado ao observar os gráficos de tensão e corrente 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, levando os usuários a buscar uma maior estabilização da transferência.

De acordo com Scotti e Ponomarev (Americo; Vladimir, 2008), 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} , a saber:

$$P_{cc} = t_{ab} + t_{cc} \quad (2.1)$$

$$f_{cc} = \frac{1}{P_{cc}} \quad (2.2)$$

$$k_{cc} = \frac{t_{cc}}{P_{cc}} \quad (2.3)$$

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

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_{cc} e t_{ab} , 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, como observado em (Rezende et al., 2011). 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 (Rezende et al., 2011), os curto-circuitos com t_{cc} inferior 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, como mencionado em trabalhos anteriores.

O tempo de curto-circuito (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. O primeiro parâmetro influencia o volume do metal líquido em transferência, sendo que um arco mais longo resulta em um volume maior (Niz et al., 2023).

A corrente média de soldagem é um parâmetro influenciado pela indutância do sistema. Maior indutância resulta em um aumento gradual da corrente e, consequentemente, em um tcc 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 tcc (Niz et al., 2023).

2.2 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 (Morettin; Singer, 2021; Montgomery, 2017).

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, podem ser mais apropriadas (Daszykowski et al., 2007).

2.2.1 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 crucial, uma vez que muitos métodos estatísticos pressupõem normalidade nos dados.

Para um teste de normalidade utilizamos as seguintes hipóteses, hipótese nula (H_0) os dados seguem uma distribuição normal e hipótese alternativa (H_1) os dados não seguem uma distribuição normal. 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. Já o teste de Anderson-Darling atribui pesos maiores às caudas da distribuição.

Aqui está a versão revisada:

O teste de Shapiro-Wilk (1965) originalmente tinha sua aplicação restrita a tamanhos de amostra inferiores a 50. Esse teste foi pioneiro na identificação de desvios da normalidade devido à assimetria, curtose, ou ambos. Ele se tornou a escolha preferida devido à sua elevada capacidade de detecção de desvios da normalidade (Razali; Wah et al., 2011). Dada uma amostra aleatória ordenada, representada por $x_1 < x_2 < \dots < x_n$, a estatística de teste original de Shapiro-Wilk (Shapiro, 1965) é definida como:

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)}\right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.4)$$

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 um valor de um 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,

$$D = \max |F_n(x) - F(x)| \quad (2.5)$$

A distribuição de D é usada para calcular a estatística de teste T , que é definida como:

$$T = \sqrt{n}D \quad (2.6)$$

onde n é o tamanho da amostra.

A interpretação de T está relacionada 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. Ele é uma extensão do teste de Kolmogorov-Smirnov, dando mais peso às caudas da distribuição, o que o 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,

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i - 1) [\ln(F(x_{(i)})) + \ln(1 - F(x_{(n+1-i)}))] \quad (2.7)$$

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.

Este teste é particularmente útil quando há interesse em identificar desvios significativos nas caudas da distribuição, sendo uma opção mais poderosa em comparação com o teste de Kolmogorov-Smirnov, especialmente para amostras de tamanho moderado a grande.

A estatística de teste é calculada com base nas diferenças entre a distribuição observada e a teórica. Estabelecimento do Nível de Significância (α), geralmente, usa-se um nível de significância de 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.

É importante ressaltar que, de acordo com o teorema do limite central, se $n > 30$ e a população tem qualquer distribuição então a distribuição das médias amostrais pode ser aproximada por uma distribuição normal (Morettin; Singer, 2021).

2.2.2 CORRELAÇÃO DE PEARSON, SPEARMAN E KENDAL

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 a tomada de decisões informadas para cada aplicação (Morettin; Singer, 2021).

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 intensidade diz respeito ao grau de relacionamento entre duas variáveis, 0 indica ausência de correlação linear.

A mais popular, a de Correlação de Pearson, que é uma análise paramétrica

para medir se duas variáveis estão relacionadas de maneira linear. 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* (Morettin; Singer, 2021).

A fórmula para o coeficiente de correlação de Pearson (r) entre duas variáveis X e Y em uma amostra de tamanho n é dada por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2.8)$$

Onde:

- X_i e Y_i são os valores individuais das duas variáveis,
- $\bar{X}$ e $\bar{Y}$ são as médias das variáveis X e Y , respectivamente.

Interpretação do coeficiente de correlação (r):

- $r = 1$: Correlação positiva perfeita (quando uma variável aumenta, a outra também aumenta de maneira linear).
- $r = -1$: Correlação negativa perfeita (quando uma variável aumenta, a outra diminui de maneira linear).
- $r = 0$: 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. Vale ressaltar que a correlação não implica causalidade; ou seja, apenas porque duas variáveis estão correlacionadas, não significa que uma cause a outra.

Essa medida é amplamente utilizada em diversas áreas, como estatística, economia, psicologia e ciências naturais, para compreender a relação entre variáveis quantitativas.

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 (rho), é calculado da seguinte forma:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (2.9)$$

Onde:

- d_i é a diferença entre os postos das observações nas duas variáveis,
- n é o número total de observações.

A interpretação do coeficiente de correlação de Spearman é semelhante à de Pearson, mas está mais relacionada à presença de uma relação monotônica:

- $\rho = 1$: Correlação positiva perfeita monotônica (quando uma variável aumenta, a outra também aumenta de maneira monotônica).
- $\rho = -1$: Correlação negativa perfeita monotônica (quando uma variável aumenta, a outra diminui de maneira monotônica).
- $\rho = 0$: Ausência de 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. Essa medida é amplamente aplicada em diversas áreas, incluindo estatística, psicologia, biologia e ciências sociais.

A correlação de Kendall, também conhecida como coeficiente de 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 calculado como:

$$\tau = \frac{\text{Número de pares concordantes} - \text{Número de pares discordantes}}{\text{Número total de pares distintos}} \quad (2.10)$$

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).
- $\tau = 0$: 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.

2.2.3 ANOVA E KRUSKAL-WALLIS

A análise de variância, ou ANOVA, é uma abordagem para comparar dados com diversas médias entre diferentes grupos; ela nos permite enxergar padrões e tendências com dados complexos e variados. Foi desenvolvida por Sir Ronald A. 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.

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.

A ANOVA de uma via oferece uma abordagem poderosa para avaliar diferenças significativas entre grupos, sendo uma ferramenta fundamental na análise estatística de experimentos com múltiplos tratamentos ou condições (Morettin; Singer, 2021; Montgomery, 2017).

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 (Montgomery, 2017).

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.

2.2.4 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 $\overline{Q}$ são calculados para cada par de médias, sendo $\overline{Q}$ a diferença entre as médias dividida pelo erro padrão da diferença. Em seguida, compara-se o valor calculado de $\overline{Q}$ 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.

É importante notar que o teste de Duncan é conhecido por ser conservador, buscando evitar a elevação excessiva da probabilidade de erro do tipo I durante comparações múltiplas. No entanto, ao interpretar os resultados do teste de Duncan, é crucial considerar o contexto específico do estudo e o tamanho da amostra.

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. Os intervalos de confiança ajudam a controlar a taxa global de erro de tipo I durante comparações múltiplas. Se a diferença entre as médias de dois grupos específicos for maior do que o intervalo de confiança, considera-se que essas médias são estatisticamente diferentes.

O teste de Tukey é conhecido por sua eficácia e ampla aplicabilidade em situações em que é necessário realizar comparações múltiplas. No entanto, é importante considerar o tamanho da amostra, a distribuição dos dados e outros fatores específicos do estudo ao interpretar os resultados do teste de Tukey. Em geral, ele fornece uma abordagem robusta para evitar a inflação do erro do tipo I, tornando-o uma escolha comum em experimentos que envolvem a comparação de várias médias.

O procedimento de Bonferroni é uma técnica de ajuste de correção usada em testes de comparação múltipla para controlar o erro do tipo I. 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. A ideia é simples: se você estiver realizando várias comparações, 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.

Embora o procedimento de Bonferroni seja conservador e eficaz para controlar o erro do tipo I, ele pode ser mais restritivo do que outros métodos, como o teste de Tukey. Portanto, a escolha entre esses métodos depende do contexto específico do estudo e das metas de análise. O procedimento de Bonferroni é amplamente utilizado quando a ênfase está em evitar falsas descobertas, mesmo que isso signifique ser mais

cauteloso ao identificar diferenças significativas entre grupos.

2.2.5 SÉRIES TEMPORAIS

O estudo de séries temporais remonta ao século XIX, mas a formalização matemática e estatística ganhou força 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 (Ariyo; Adewumi; Ayo, 2014; Khan; Alghulaiakh, 2020).

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, podem ser encontradas em várias áreas, incluindo finanças, economia, meteorologia, medicina e muitas outras (Pinheiro; Graciano; Severo, 2013; Bressan, 2007; Ballini, 2000; Antunes; Cardoso, 2015).

Dentre as características das séries temporais temos a presença de uma tendência, direção geral da série ao longo do tempo, pode ser ascendente, descendente ou inexistente. A sazonalidade também é uma característica, são padrões que se repetem em intervalos regulares de tempo, como estações do ano ou feriados. Series temporais também operam em ciclos, flutuações que não são sazonais e geralmente têm um período mais longo, relacionado a fatores econômicos ou outros eventos. 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 (*AutoRegressive Integrated Moving Average*) e modelos sazonais são frequentemente utilizados. Ferramentas modernas incluem métodos de aprendizado de máquina para lidar com padrões complexos (Newbold, 1983; Khan; Alghulaiakh, 2020; Tseng; Yu; Tzeng, 2002).

3 Materiais e métodos

Os experimentos foram conduzidos como parte do Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás, os experimentos e outros resultados estão descritos na dissertação (Niz et al., 2023).

3.1 MATERIAIS

Foram utilizadas chapas de aço carbono com 10 mm de espessura como materiais base. O arame eletrodo utilizado nas soldagens foi o AWS ER70S-6, com diâmetro de 1,2 mm. 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) constantes 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 misturas comerciais fornecidas pela empresa White Martins.

Para aquisição e análise dos dados, utilizamos um condicionador de sinais que coletou dados de tensão e corrente a uma taxa de 5 kHz. A avaliação dos parâmetros relacionados à soldagem foram realizados por meio de programas desenvolvidos em RStudio.

3.2 MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos utilizando o robô conectado à fonte, mantendo a distância de bico à peça (DBCP) 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.

Fixando a tensão de soldagem, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação, variando os ajustes de indutância da fonte (ks) para três gases distintos em três tensões de soldagem diferentes, como mostrado na tabela 3.1. A velocidade de alimentação foi mantida constante em 3 m/min, e a velocidade de soldagem em 40 cm/min. Em cada experimento, um cordão de solda com aproximadamente 15 cm de comprimento foi produzido.

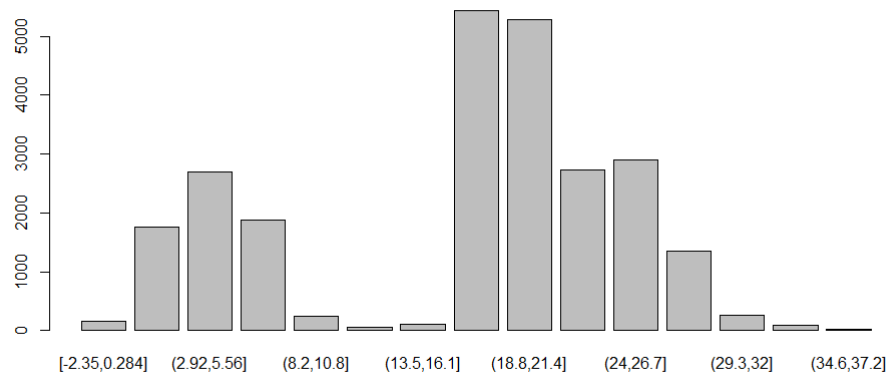
Tabela 3.1: Parâmetros de soldagem utilizados nos testes.(x representa ausência de experimento)

Ar	Ar+25%CO2	CO2
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	

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 parâmetros cruciais 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. Matriz de correlações foi criada a partir das medias dos valores para todos os parâmetros de todos os experimentos.

Considerando que as tensões de arco aberto e curto-circuito são distintas e discerníveis, um histograma foi construído com 15 intervalos de valores 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 3.1.

Figura 3.1: Histograma dos valores de tensão de soldagem divididos em 15 intervalos.



Fonte : Própria.

4 Resultados e discussões

Os resultados da análise dos dados coletados são apresentados neste capítulo. Inicialmente, foram aplicados testes de normalidade, como Shapiro-Wilk, Komogorov-Smirnov e Anderson-Darling, nos parâmetros extraídos dos dados de tensão e corrente de soldagem. Esses parâmetros 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 à realização de testes de correlação, empregando os métodos de Pearson, Spearman e Kendall para avaliar associações entre pares de parâmetros, tais testes foram feitos apenas no experimento feito com o gás 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 parâmetros 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 parâmetros, culminando na avaliação de variações significativas entre os grupos de gases.

4.1 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, $w = 0.97108$, $p = 0.0007892$, o tempo de arco aberto demonstrou não seguir uma distribuição normal, $w = 0.50024$, $p = 2.2e-16$. A análise da tensão de curto-circuito também revelou uma não normalidade nos dados, conforme indicado pela estatística de teste ($w = 0.63817$, $p = 2.2e-16$), 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 ($w = 0.98351$, $p = 2.2e-16$). 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.

4.2 TESTE DE CORRELAÇÃO DOS DADOS

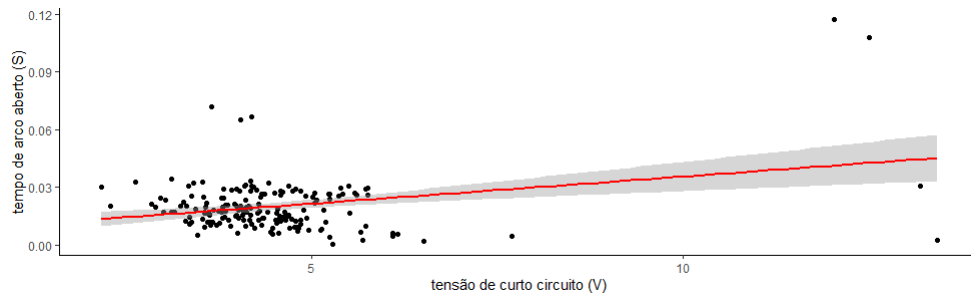
Os resultados das análises de correlação entre o tempo de curto circuito e o tempo de arco aberto indicam a falta de uma correlação significativa. O teste de correlação de Pearson ($r=0.8606$, $P=0.8606$), a correlação de Spearman ($r_s=0.1435837$, $P=0.05381$) e a correlação de Kendall ($\tau=0.09190987$, $P=0.06926$), esses resultados sugerem 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 evidências de uma correlação ($\rho=0.05540823$, $P=0.4588$), assim como a correlação de Kendall ($\tau=0.0391346$, $P=0.4379$).

Ao investigar a possível correlação entre a tensão de arco aberto e a taxa de subida da corrente, os resultados dos testes sugerem 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 apontou para uma correlação ($\rho=-0.05752344$, $P=0.4418$), assim como a correlação de Kendall ($\tau=-0.04193142$, $P=0.402$).

Ao explorar a possível correlação entre o tempo de arco aberto e a tensão de curto circuito, os testes revelaram o seguinte: a correlação de Pearson indicou uma correlação significativa ($cor=0.2965003$, $P=5.059e-05$); 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, gráfico de dispersão na figura 4.1.

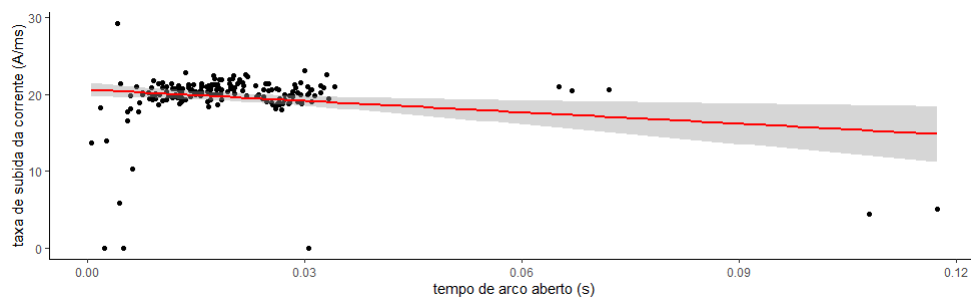
Figura 4.1: Gráfico de dispersão para tensão de curto circuito e tempo de arco aberto.



Fonte : Própria.

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, e possível verificar no gráfico da figura 4.2.

Figura 4.2: Gráfico de dispersão para tempo de arco aberto e taxa de subida da corrente.

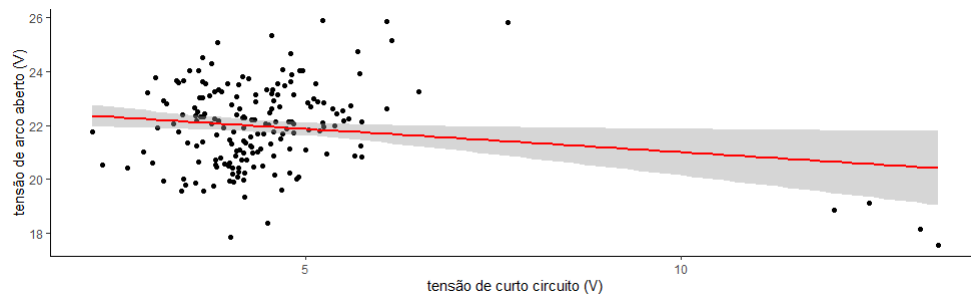


Fonte : Própria.

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 4.3, pode-se concluir que a correlação entre o tensão de curto circuito e a tensão de arco aberto não é estatisticamente relevante.

Figura 4.3: Gráfico de dispersão para tensão de curto circuito e tensão de arco aberto.

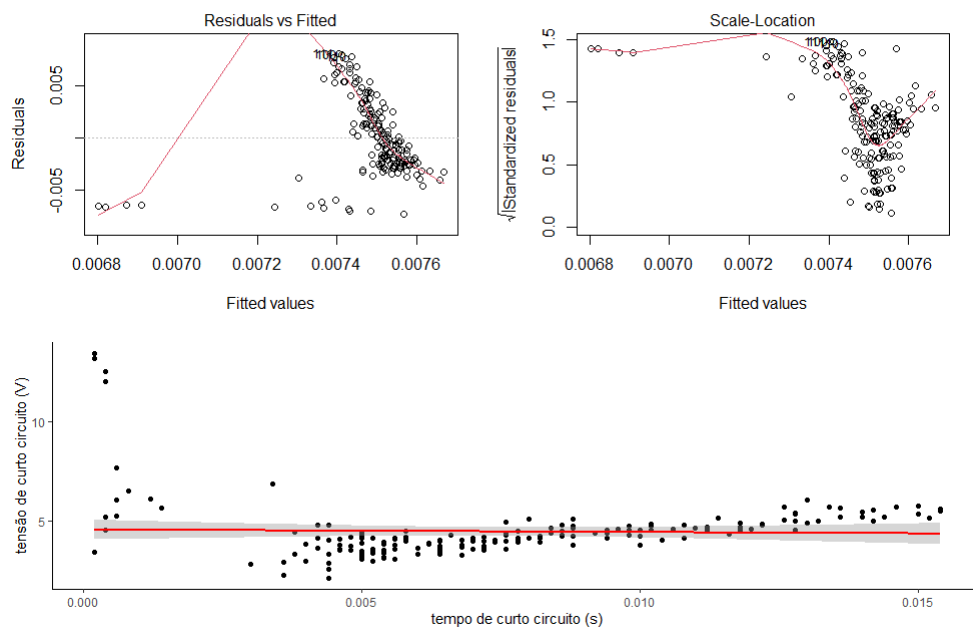


Fonte : Própria.

Os resultados dos testes para tempo de curto circuito e tensão de curto circuito foram novamente conflitante. A distribuição de pontos no gráfico de resíduos versus valores previstos revelou uma falta de homogeneidade, figura 4.4, indicando a ausência de homoscedasticidade nos dados. Além disso, a análise do gráfico sugeriu 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.

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 ($\text{cor}=-0.03168855$, $P=0.6711$). Em contrapartida, a correlação de Spearman evidenciou que o valor dessa correlação é estatisticamente diferente de zero ($\rho=0.4688246$, $P=2.473\text{e-}11$), e a correlação de Kendall indicou uma correlação significativa entre esses tempos ($\tau=0.4138907$, $P=2.2\text{e-}16$). É relevante observar que os valores das correlações de Spearman e Kendall foram próximos, e o gráfico de dispersão também mostra uma forte correlação, figura 4.4.

Figura 4.4: Gráfico de resíduos, resíduos padronizados e de dispersão para tempo de curto circuito e tensão de curto circuito.



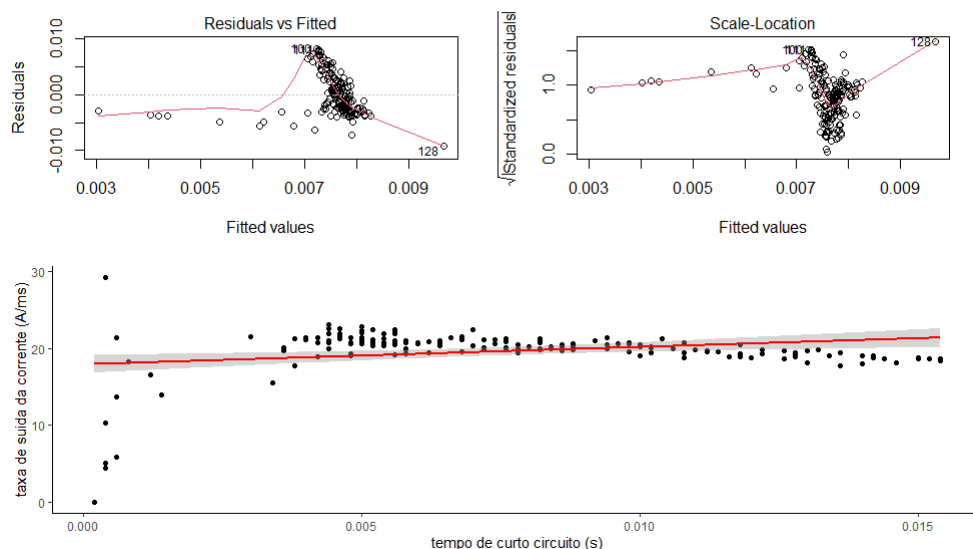
Fonte : Própria.

Os resultados dos testes estatísticos aplicados às variáveis tempo de curto circuito e taxa de subida da corrente foram cuidadosamente examinados. A observação da distribuição de pontos no gráfico de resíduos versus valores previstos revelou uma falta de homogeneidade, figura 4.5, indicando a ausência de homoscedasticidade 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.

Ao analisar as correlações, o coeficiente de Pearson indicou uma correlação significativa entre o tempo de curto-circuito e o tempo de arco aberto ($\text{cor}=0.2254018$, $P=0.002218$). Porém, a correlação de Spearman revelou que o valor da correlação entre essas variáveis é estatisticamente diferente de zero ($\text{rho}=-0.3538187$, $P=9.593\text{e-}07$). A correlação de Kendall também apontou para a existência de uma correlação entre o tempo de curto-circuito e o tempo de arco aberto ($\text{tau}=-0.3079813$, $P=9.243\text{e-}10$). 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 4.5.

Figura 4.5: Gráfico de resíduos, resíduos padronizados e de dispersão para tempo de curto circuito e tensão de curto circuito.



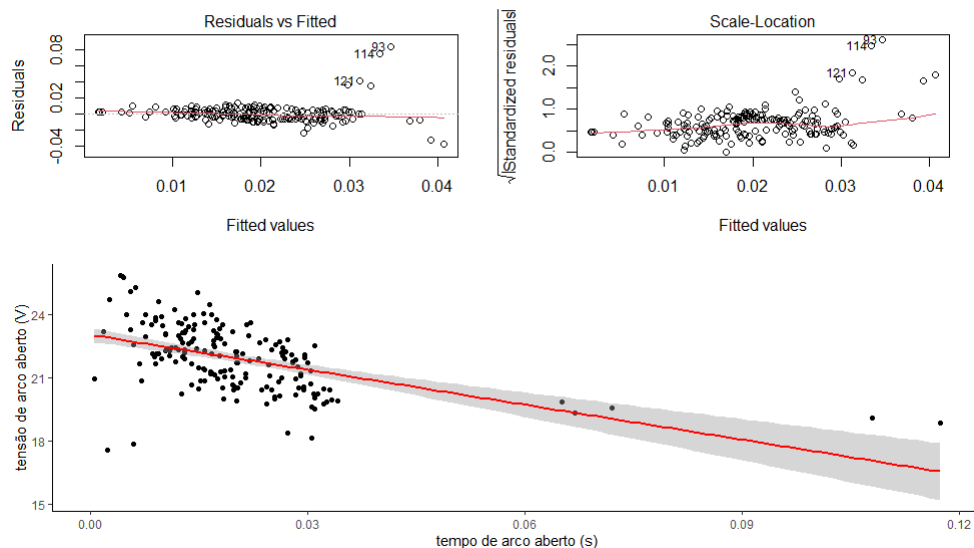
Fonte : Própria.

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 4.6, sugere a presença de homoscedasticidade nos dados. Além disso, a inspeção do gráfico revelou uma relação linear notável entre essas variáveis. A avaliação dos resíduos padronizados, conforme representado na figura 4.6, não revelou a presença de *outliers*, satisfazendo os critérios necessários para o teste de Pearson.

A aplicação do teste de Pearson destacou uma correlação significativa entre o tempo de curto-circuito e o tempo de arco aberto ($\text{cor} = -0.5102547$, $P = 2.177 \times 10^{-13}$). Os resultados da correlação de Spearman indicaram que essa associação é estatisticamente diferente de zero ($\text{rho} = -0.5799545$, $P < 2.2 \times 10^{-16}$), enquanto a correlação de Kendall também apontou para uma relação significativa entre esses tempos ($\text{tau} = -0.4243076$, $P < 2.2 \times 10^{-16}$). É importante salientar que os valores das correlações de Pearson, Spearman e Kendall, apresentados de forma gráfica na figura 4.6, mostraram uma proximidade entre si, consolidando a consistência dos resultados obtidos

por meio de diferentes abordagens de correlação.

Figura 4.6: Gráfico de resíduos, resíduos padronizados e de dispersão para tempo de arco aberto e tensão de arco aberto.

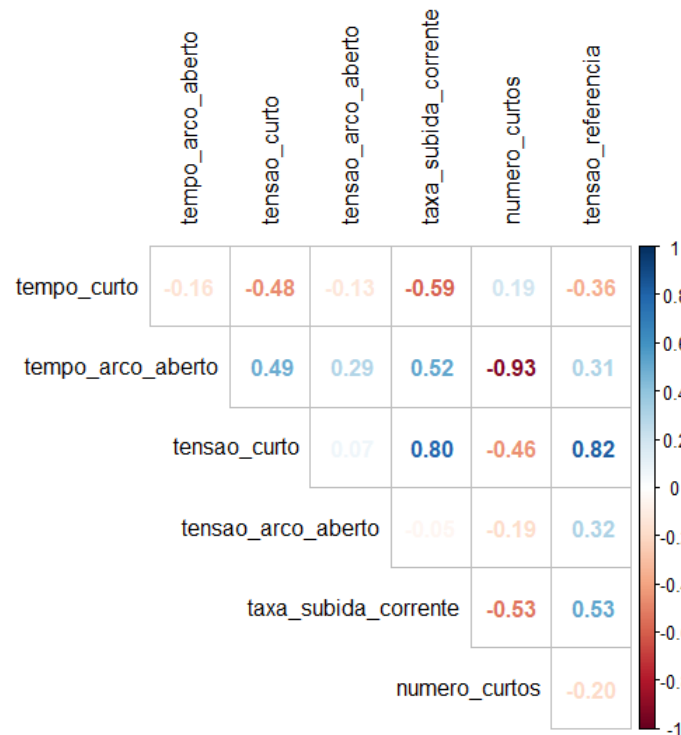


Fonte : Própria.

4.3 MATRIZ DE CORRELAÇÕES

Na matriz de correlações do argônio, figura 4.7, temos que o tempo de curto circuito apresenta correlações significativas com diversos parâmetros 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 parâmetros, 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 4.7: Matriz de correlação com o grau de significância para o argônio.

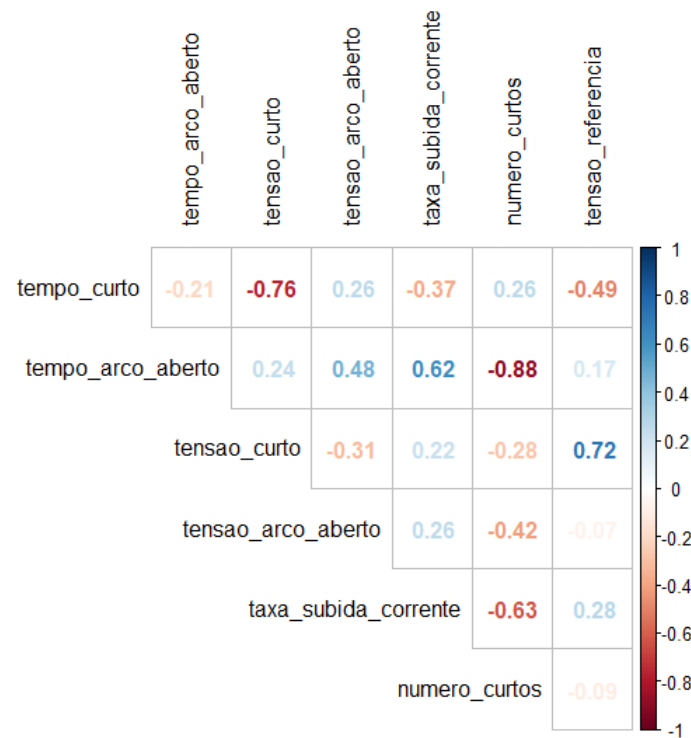


Fonte : Própria.

No contexto da mistura de argônio mais gás carbônico, figura 4.8, os parâmetros 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).

Para o gás carbônico, figura 4.9, observa-se que os parâmetros do processo de soldagem apresentam distintas correlações. 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

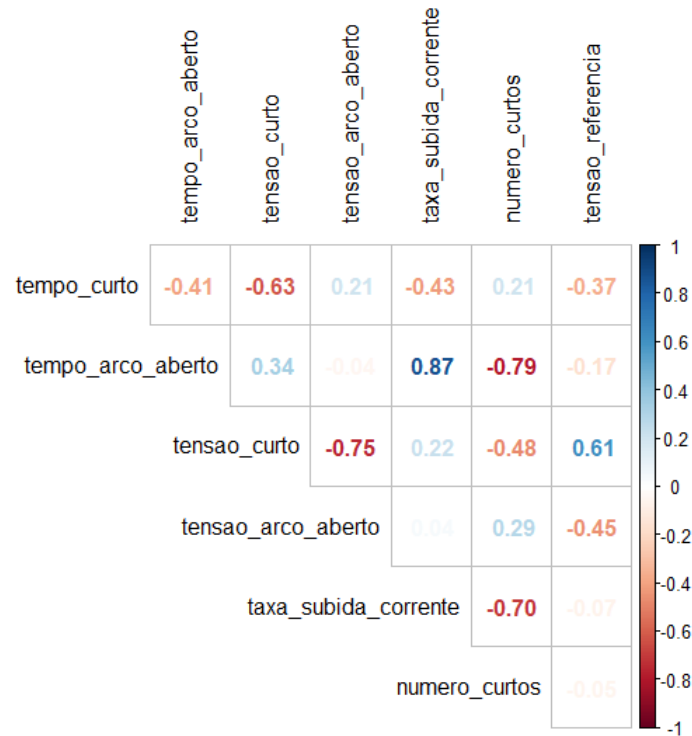
Figura 4.8: Matriz de correlação com o grau de significância para o argônio mais gás carbônico.



Fonte : Própria.

corrente (-0,43) e o tempo de arco aberto (-0,41). O tempo de arco aberto, destaca-se 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 4.9: Matriz de correlação com o grau de significância para o gás carbônico.



Fonte : Própria.

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 gás carbônico(-0,88) e para o gás carbônico 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 gás carbônico (0,62) e para o gás carbônico 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 significantes. A correlação entre a taxa de subida da corrente e o número de curtos foi para o argônio (-0,53), para o argônio mais gás carbônico (-0,63) e para o gás carbônico (-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 gás carbônico (-0,76) e para o gás carbônico (-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

gás carbônico(0,72) e para o gás carbônico (0,61).

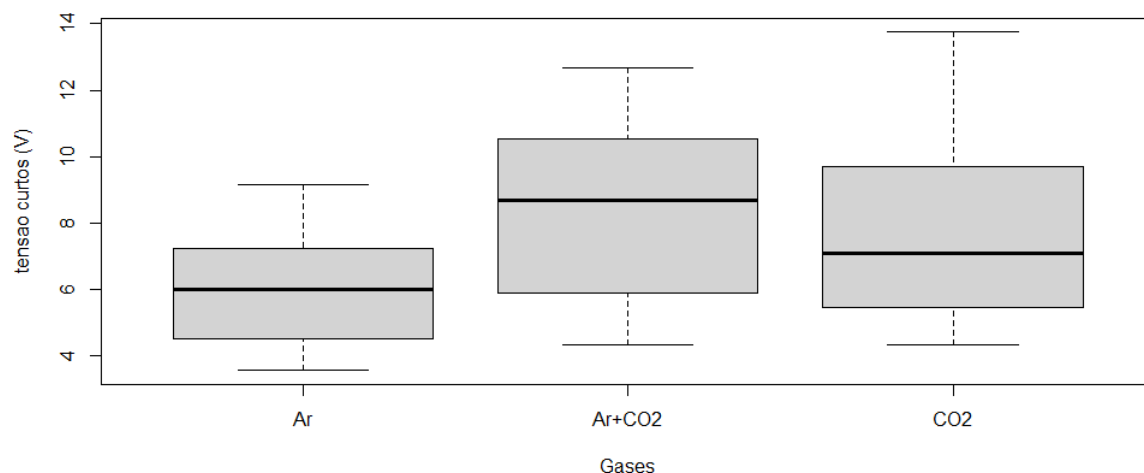
4.4 ANOVA, KRUSKAL-WALLIS E *POST-HOC*

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 ($P=0.01968$), isso pode provocar 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 4.10, indicando que a composição gasosa influencia de maneira significativa as médias de tensão de curto-circuito.

Figura 4.10: *Box plot* dos valores de tensão de curto circuito para os três gases.

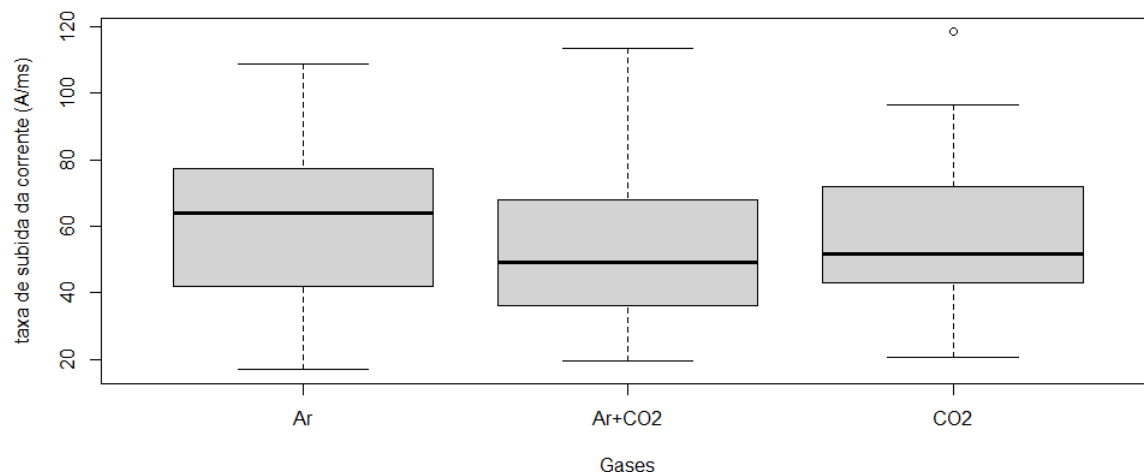


Fonte : Própria.

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: $W=0.9464$, $P=0.2909$). O teste de homogeneidade de Levene mostrou que os dados são homogêneos ($P=0.7787$), 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 4.11.

Figura 4.11: *Box plot* dos valores de taxa de subida da corrente durante o curto circuito para os três gases.



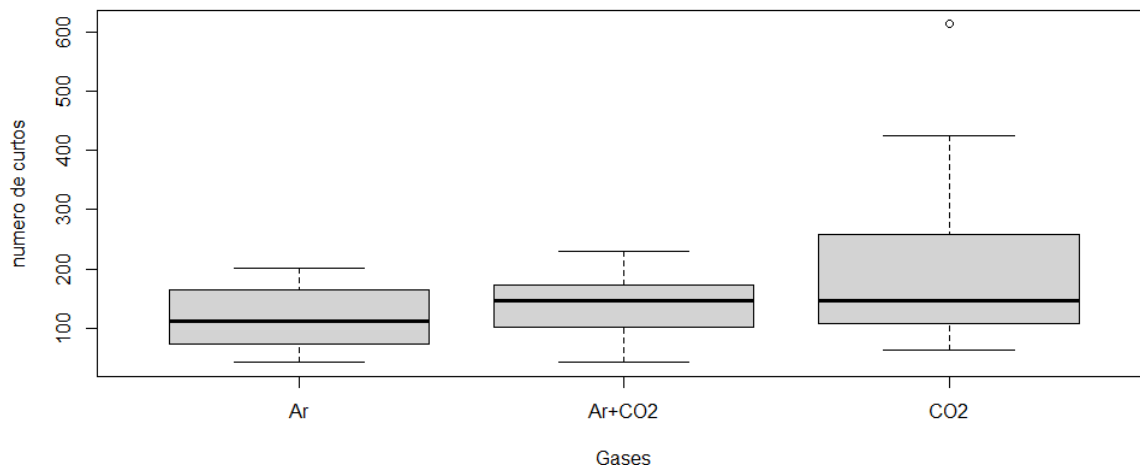
Fonte : Própria.

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 *post-hoc* 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, é possível analisar o gráfico da figura 4.12, que mostra o CO2 distintamente destacado em comparação com os demais gases.

Figura 4.12: *Box plot* dos valores de números de curto circuito para os três gases.

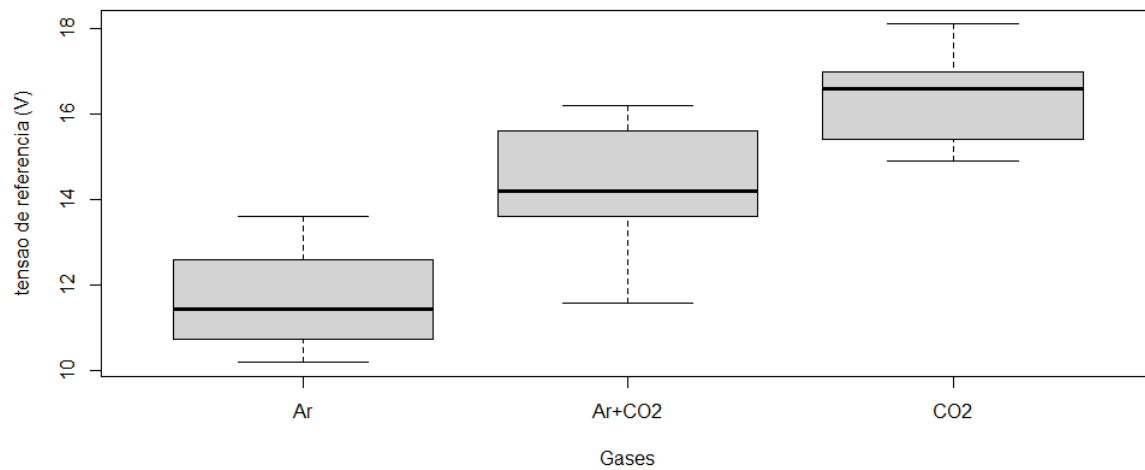


Fonte : Própria.

Analisando a tensão de referência, o teste de Shapiro-Wilk indicara 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 ($P=0.556$), 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 [$F(2, 67) = 102.8$; $P < 2e-16$]. Os testes *post-hoc* de Duncan indicaram diferenças estatisticamente significativas entre todos os gases testados: CO2 e Ar ($P < 2e-16$), Ar e Ar+CO2 ($P < 2e-16$) e CO2 e Ar+CO2 ($P=8.7e-08$). Os testes *post-hoc* de Tukey e Bonferroni corroboraram esses resultados, indicando diferenças altamente significativas entre todos os pares de gases ($P < 2e-16$ para Ar e Ar+CO2, CO2 e Ar, CO2 e Ar+CO2). Neste caso todos os testes mostraram o mesmo, que os gases têm valores diferentes de tensão de referência, como visto no gráfico da figura 4.13.

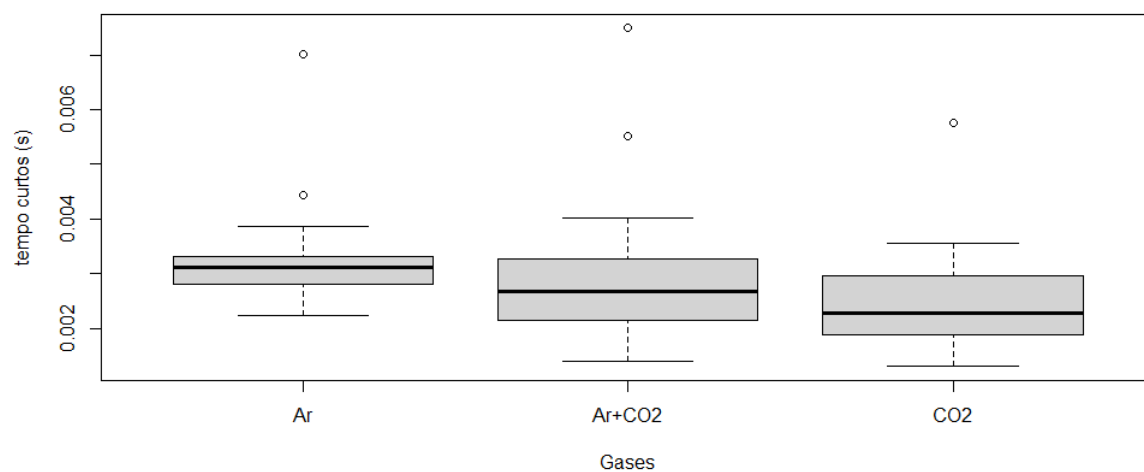
Figura 4.13: *Box plot* dos valores de tensão de referência para os três gases.



Fonte : Própria.

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: $W=0.7040$, $P=1.137e-05$; 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 ver na figura 4.14.

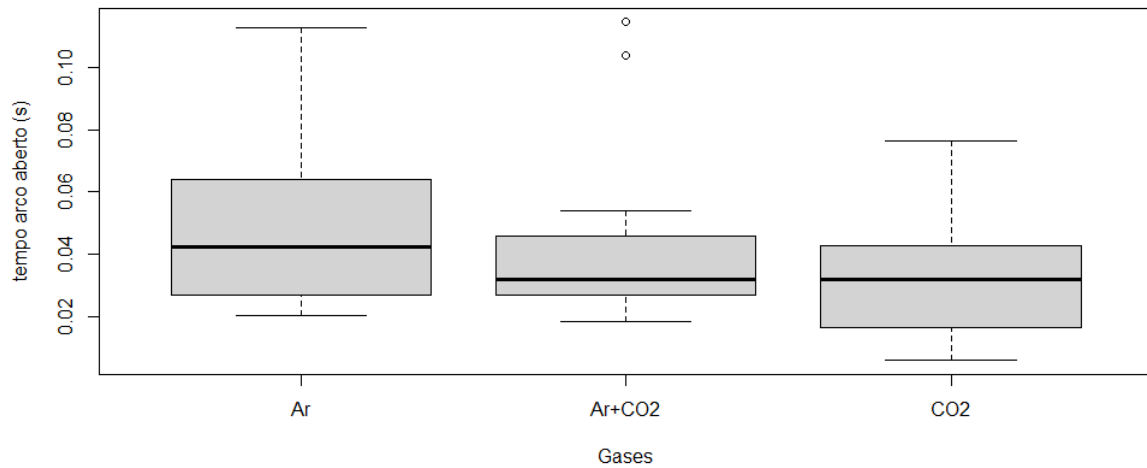
Figura 4.14: *Box plot* dos valores de tempo de curto circuito para os três gases.



Fonte : Própria.

A análise estatística referente ao tempo de arco aberto, considerando diferentes gases, foi realizado primeiramente 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: $W=0.6997$, $P=7.23e-06$; 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 ver no gráfico da figura 4.15.

Figura 4.15: *Box plot* dos valores de tempo de arco aberto para os três gases.

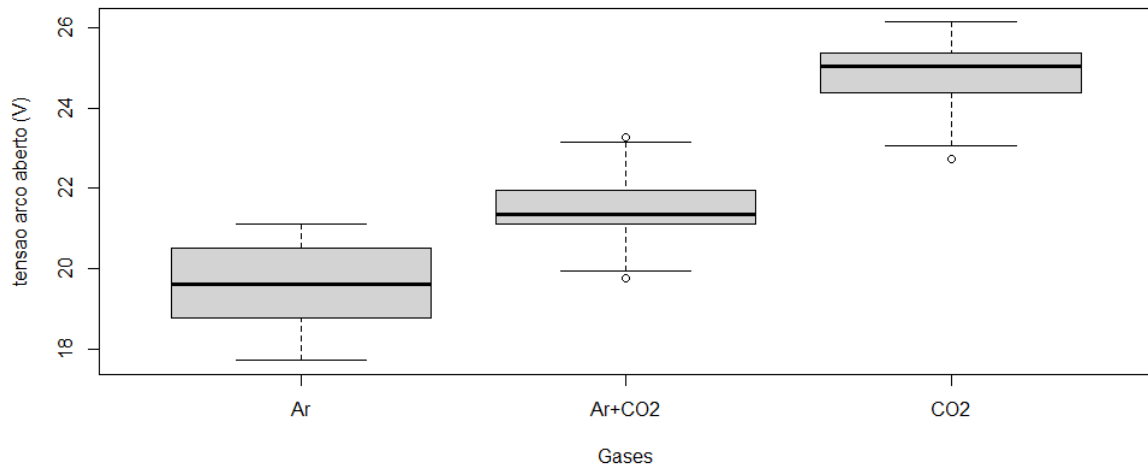


Fonte : Própria.

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 [$\chi^2(2) = 54.317$; $P = 1.604e-12$].

Os resultados do teste *post-hoc* Dunn indicaram diferenças estatisticamente significantes entre todos os grupos de gases analisados. Há diferenças entre CO2 e Ar ($P=4.4e-08$), entre Ar+CO2 e Ar ($P=7.32e-05$) e entre CO2 e Ar+CO2 ($P=8.89e-08$), como é possível ver no gráfico da figura 4.16.

Figura 4.16: *Box plot* dos valores de tensão de arco aberto para os três gases.

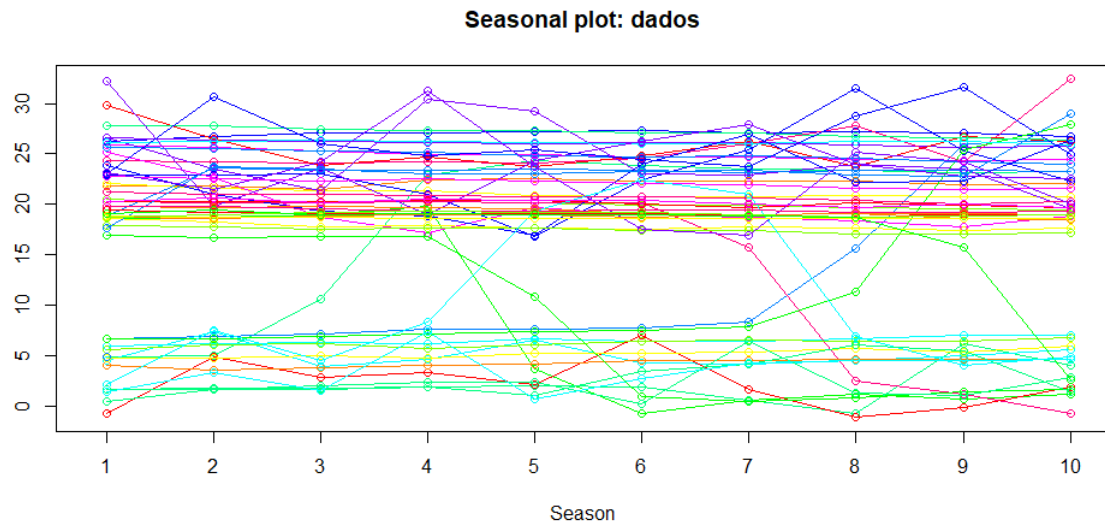


Fonte : Própria.

4.5 SÉRIES TEMPORAIS

Utilizando o ARIMA e o ETS para criar modelos de series temporais para prever o comportamento da tensão durante a soldagem por curto circuito. Primeiramente foi feito um *seasonal plot* para tentar identificar possíveis sazonalidades nos dados, o que não foi possível, mas é possível identificar pelo gráfico, figura 4.17, duas faixas de valores para a tensão, o que é o esperado para a soldagem MIG/MAG operado no modo curto circuito.

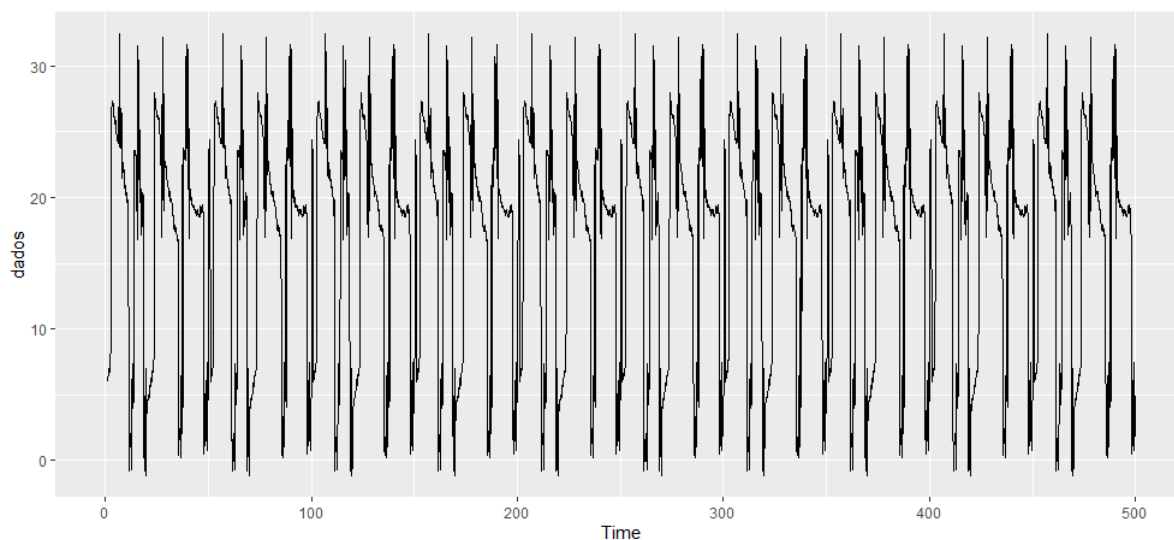
Figura 4.17: *Seasonal plot* dos valores de tensão de soldagem.



Fonte : Própria.

Utilizando um *dataframe* com os 500 primeiros valores de tensão do experimento com argônio mais co_2 , com tensão de 19 e taxa de subida da corrente de 19.63 A/ms. O *data frame* deve ser convertido em série temporal, para isso deve ser escolhido 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 *dataframe* é transformado em uma série temporal, figura 4.18.

Figura 4.18: Gráfico dos valores de tensão de soldagem como série temporal.



Fonte : Própria.

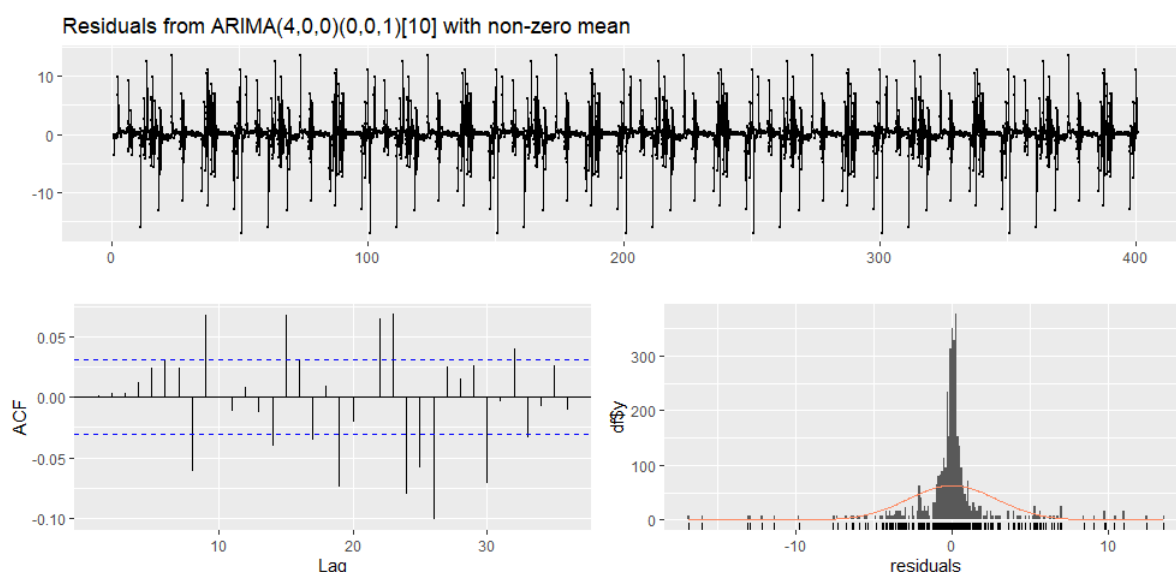
Foi utilizada a função `auto.arima`, do pacote `forecast`, para determinar o melhor tipo de *arima* para os dados, neste caso foi o $ARIMA(4,0,0)$, isso indica que a série temporal original foi usada diretamente, sem diferenciação ($d=0$), e que as últimas 4 observações foram usadas para prever a próxima. A componente sazonal $(0,0,1)[10]$, a sazonalidade ocorre em múltiplos de 10, 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 predição de uma série temporal a partir de alguns dados, por exemplo o *Root Mean Squared Error* ($RMSE=2.829431$), que mede a precisão média das previsões, 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, este valor ficou muito alto. A partir destas métricas podemos concluir que 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, observamos que a média se mantém constante ao longo do tempo, indicando uma boa captura das tendências pelo modelo. A variação dos resíduos também parece ser 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 4.19.

Figura 4.19: Gráfico dos resíduos do ARIMA criado.



Fonte : Própria.

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 ($p\text{-value} < 2.2e-16$), indicando que os resíduos não se alinham com uma distribuição normal.

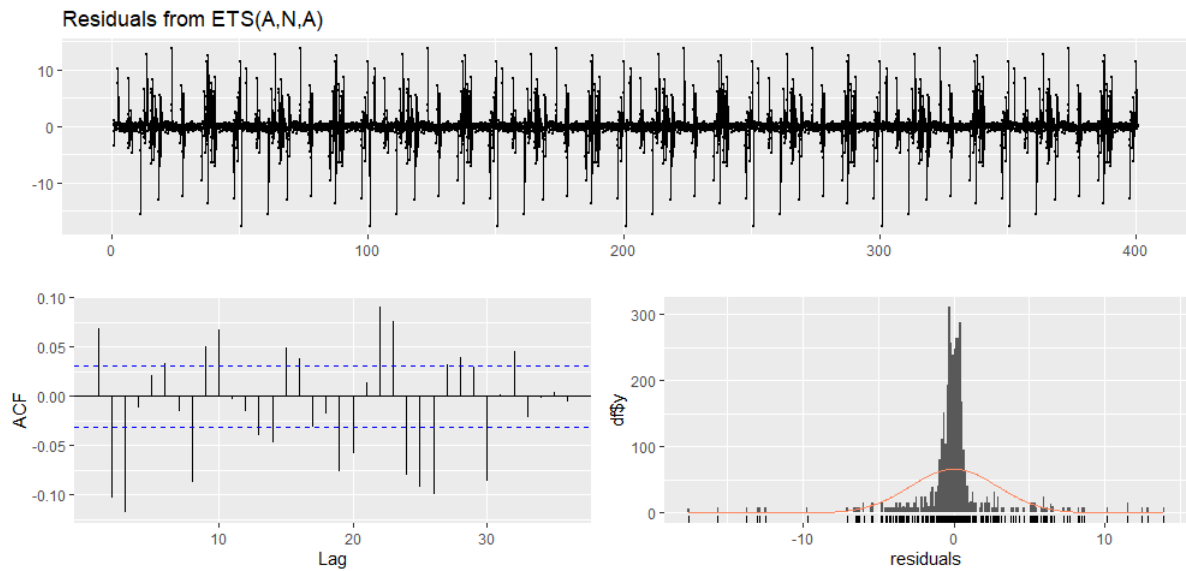
Foi criado um modelo de previsão de série temporal utilizando um modelo de suavização exponencial ETS, neste caso foi o ETS(A,N,A), o erro é A (Aditivo), indica que o modelo assume que os erros são aditivos. A tendência é N (Nenhuma), sugere que não há componente de tendência no modelo, a série é considerada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

Avaliando este modelo de previsão pelas métricas anteriormente citadas temos que o *Root Mean Squared Error* ($RMSE=2.892597$) ficou novamente um valor muito baixo para a precisão média das previsões. O *Mean Absolute Percentage Error* ($MAPE=27.45801$) teve um valor muito alto média percentual dos erros em relação aos valores reais. A partir destas métricas podemos concluir novamente que 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, notamos que a média

permanece estável ao longo do tempo, sugerindo que o modelo efetivamente captura as tendências. A variação dos resíduos também parece 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 4.20.

Figura 4.20: Gráfico dos resíduos do ETS criado.

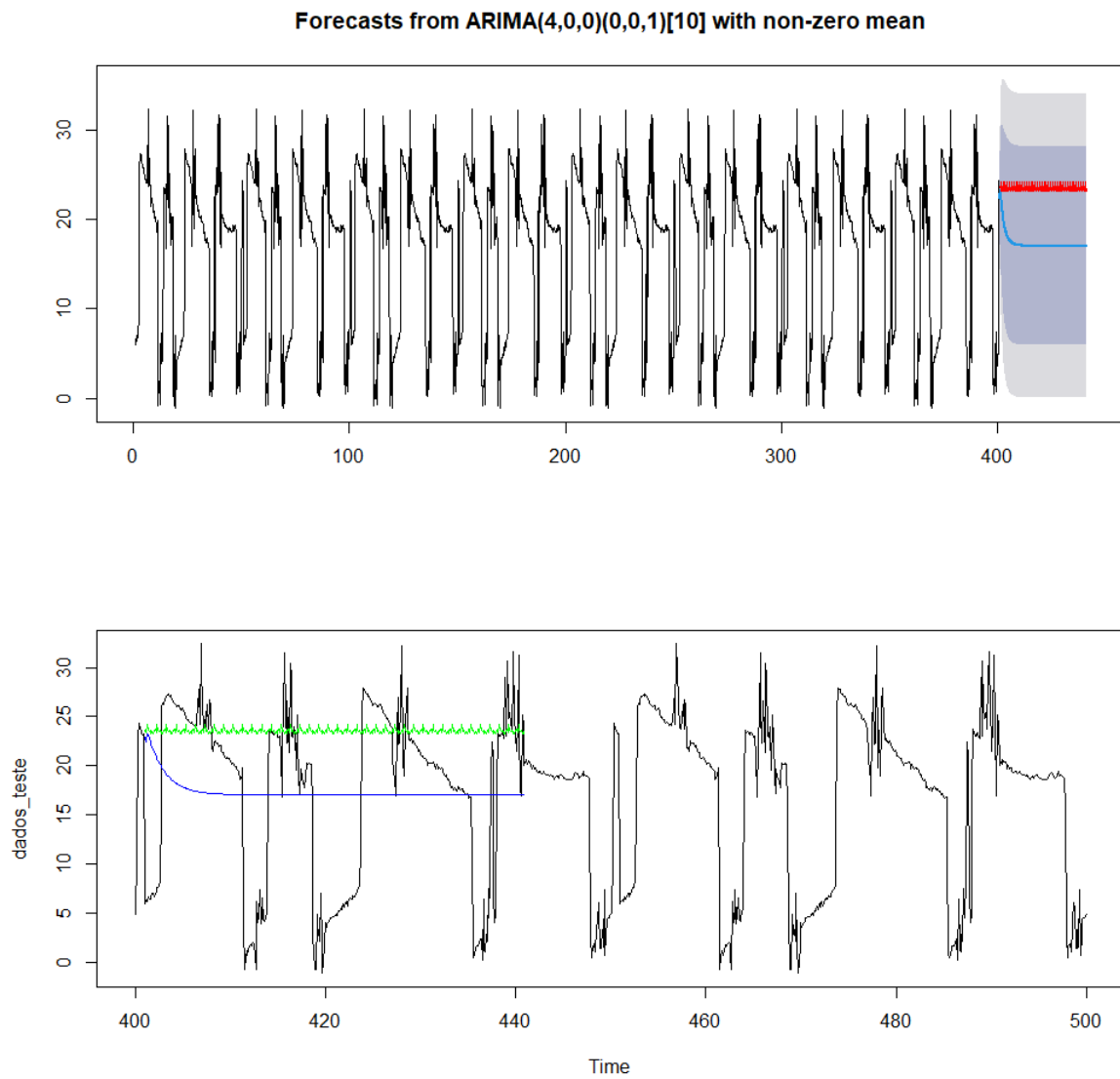


Fonte : Própria.

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 ($p\text{-value} < 2.2e-16$), sugerindo que os resíduos não aderem a uma distribuição normal.

É possível ver nos gráficos da figura 4.21 mostram previsões muito ruins do comportamento da tensão durante o soldagem. Por causa da natureza caótica da soldagem por curto circuito, os modelos utilizados não foram capazes de produzir previsões precisas.

Figura 4.21: Gráfico dos dados e das previsões criadas pelo ARIMA e ETS.



Fonte : Própria.

5 CONCLUSÃO

Para os parâmetros, condições de soldagem e materiais utilizados neste estudo, pode-se concluir que:

- O comportamento dos parâmetros 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 distribuição normal. Apenas a tensão de arco aberto segue distribuição normal;
- A correlação entre os parâmetros: 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 parâmetros: 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 a influência do tipo de gás na tensão de curto-circuito feita com o teste de 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 de ANOVA de uma via não mostra efeito significativo do tipo de gás;
- A avaliação a influência do tipo de gás no numero de curto-circuito feita com o teste de ANOVA de uma via mostra que ha 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 a influência do tipo de gás na tensão de referencia feita com o teste de 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 testados, os testes *post-hoc* de Tukey e Bonferroni corroboraram esses resultados;
- A avaliação a 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 a 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 a influência do tipo de gás no 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 indicara 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;

Referências

ALFARO, S. C. A.; CHAWLA, K.; NORRISH, J. Computer based data acquisition for welding research and production. **Journal of materials processing technology**, Elsevier, v. 53, n. 1-2, p. 1–13, 1995.

AMERICO, S.; VLADMIR, P. **Soldagem MIG/MAG – melhor entendimento, melhor desempenho**. 05083-010 – São Paulo – SP – Brasil: Artliber Editora;, 2008.

ANTUNES, J. L. F.; CARDOSO, M. R. A. Uso da análise de séries temporais em estudos epidemiológicos. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, SciELO Brasil, v. 24, p. 565–576, 2015.

ARIYO, A. A.; ADEWUMI, A. O.; AYO, C. K. Stock price prediction using the arima model. In: IEEE. **2014 UKSim-AMSS 16th international conference on computer modelling and simulation**. [S.l.], 2014. p. 106–112.

BALLINI, R. **Analise e previsoes de vasos utilizando modelos de series temporais, redes neurais e redes neurais nebulosas**. 2000. Tese (Doutorado) — [sn], 2000.

BOHRER, C. B. Influência do gás de proteção sobre o aporte de energia na soldagem mig/mag de aços ao carbono. 2013.

BRESSAN, A. A. Tomada de decisão em futuros agropecuários com modelos de previsão de séries temporais. **RAE eletrônica**, SciELO Brasil, v. 3, 2007.

CAMARGO, L. G.; DRECHSLER, M. F.; SANTOS, C. M.; CUNHA, T. V. d. Proposta e análise de dispositivo para otimização do destacamento da gota na soldagem mig/mag. **Soldagem & Inspeção**, SciELO Brasil, v. 21, p. 83–91, 2016.

CORREIA, D. S.; GONÇALVES, C. V.; JR, S. S. da C.; FERRARESI, V. A. Comparison between genetic algorithms and response surface methodology in gmaw welding optimization. **Journal of materials processing technology**, Elsevier, v. 160, n. 1, p. 70–76, 2005.

COSTA, T. F.; FILHO, E. B.; AREVALO, H. D. H.; VILARINHO, L. O. Avaliação de processos mig/mag curto-circuito convencional e controlado para a soldagem de dutos de aço carbono em passe único. **Soldagem & Inspeção**, SciELO Brasil, v. 17, p. 356–368, 2012.

DASZYKOWSKI, M.; KACZMAREK, K.; HEYDEN, Y. V.; WALCZAK, B. Robust statistics in data analysis—a review: Basic concepts. **Chemometrics and intelligent laboratory systems**, Elsevier, v. 85, n. 2, p. 203–219, 2007.

DUTRA, J. C. et al. Mig/mag–transferência metálica por curto-circuito–fontes de soldagem versus gases do arco. **Soldagem e Inspeção**, v. 13, n. 1, p. 19–24, 2008.

FERNANDES, D. B.; JÚNIOR, L. C. d. M.; VILARINHO, L. O.; SCOTTI, A. Ensaio para medição de nível e alcance de respingos em soldagem mig/mag. **Soldagem & Inspeção**, SciELO Brasil, v. 15, p. 150–155, 2010.

GAMA, P. H. A. Controle estatístico de processos aplicado ao setor de comércio de buchas vegetais. Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

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**, Springer, v. 21, p. 1862–1872, 2012.

GUAN, Z. Q.; ZHANG, H. X.; LIU, X. G.; BABKIN, A.; CHANG, Y. L. Effect of magnetic field frequency on the shape of gmaw welding arc and weld microstructure properties. **Materials Research Express**, IOP Publishing, v. 6, n. 8, p. 0865e5, 2019.

HIRATA, E. K.; BELTZAC, L. F.; OKIMOTO, P. C.; SCOTTI, A. Influência da corrente sobre o rendimento bruto de fusão em soldagem mig/mag. **Soldagem & Inspeção**, SciELO Brasil, v. 19, p. 159–167, 2014.

JORGE, V. L.; SCOTTI, F. M.; REIS, R. P.; SCOTTI, A. Wire feed pulsation as a means of inducing surface tension metal transfer in gas metal arc welding. **Journal of Manufacturing Processes**, Elsevier, v. 62, p. 655–669, 2021.

KHAN, S.; ALGHULAIKHA, H. Arima model for accurate time series stocks forecasting. **International Journal of Advanced Computer Science and Applications**, Science and Information (SAI) Organization Limited, v. 11, n. 7, 2020.

MELLO, H. F. d. et al. Análise da influência dos gases de proteção no processo de soldagem mig/mag sobre distorções de chapas de aço. Joinville, SC, 2015.

MENESES, V. A. d. et al. Efeito da estabilidade da transferência metálica (respingos) na soldagem mig/mag por curto-circuito sobre a geração de fumos e gases. Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. [S.l.]: John wiley & sons, 2017.

MORETTIN, P. A.; SINGER, J. M. Estatística e ciência de dados. **Texto Preliminar, IME-USP**, 2021.

NEWBOLD, P. Arima model building and the time series analysis approach to forecasting. **Journal of forecasting**, Wiley Online Library, v. 2, n. 1, p. 23–35, 1983.

NIZ, W. R. et al. Influência da taxa de subida da corrente na regularidade do processo mig/mag por curto-circuito. Universidade Federal de Goiás, 2023.

PESSOA, E. C. P. Estudo da variação da porosidade ao longo do cordão em soldas subaquáticas molhadas. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

PINHEIRO, A.; GRACIANO, R. L. G.; SEVERO, D. L. Tendência das séries temporais de precipitação da região sul do brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 28, p. 281–290, 2013.

QUINTINO, L.; LISKEVICH, O.; VILARINHO, L.; SCOTTI, A. Heat input in full penetration welds in gas metal arc welding (gmaw). **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 68, p. 2833–2840, 2013.

RAZALI, N. M.; WAH, Y. B. et al. Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. **Journal of statistical modeling and analytics**, v. 2, n. 1, p. 21–33, 2011.

REZENDE, G. M. C. d.; LISKÉVYCH, O.; VILARINHO, L. O.; SCOTTI, A. Um critério para determinar a regulação da tensão em soldagem mig/mag por curto-circuito. **Soldagem & Inspeção**, SciELO Brasil, v. 16, p. 98–103, 2011.

SCHAFRANSKI, L. L. et al. 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. 2016.

SOUZA, D. Manual de utilização do programa de análise de curto-circuito para determinação da estabilidade de transferência no processo de soldagem mig/mag. **Relatório Interno Laprosolda UFU 13 2009**, v. 1, n. 13, p. 9p, 2009.

SOUZA, D. et al. Levantamento de mapas operacionais de transferência metálica para soldagem mig/mag de aço ao carbono na posição plana. Universidade Federal de Uberlândia, 2010.

SOUZA, D.; ROSSI, M. L.; KEOCHEGUERIAN, F.; NASCIMENTO, V. C. d.; VILARINHO, L. O.; SCOTTI, A. Influência da regulação de parâmetros de soldagem sobre a estabilidade do processo mig/mag operando em curto-circuito. **Soldagem & Inspeção**, SciELO Brasil, v. 16, p. 22–32, 2011.

TATAGIBA, L. C. S.; GONÇALVES, R. B.; PARANHOS, R. Tendências no desenvolvimento de gases de proteção utilizados na soldagem mig/mag. **Soldagem & Inspeção**, SciELO Brasil, v. 17, p. 218–228, 2012.

TSENG, F.-M.; YU, H.-C.; TZENG, G.-H. Combining neural network model with seasonal time series arima model. **Technological forecasting and social change**, Elsevier, v. 69, n. 1, p. 71–87, 2002.

ULLER, J. C. A influência da indutância na geometria do cordão de solda no processo mig/mag. 2013.