

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Orlando Mauricio Castellanos Gonzalez

**Estudo do efeito do uso de parâmetros de
corrente pulsada na soldagem molhada com
eletrodo revestido**

Belo Horizonte

2024

Orlando Mauricio Castellanos Gonzalez

Estudo do efeito do uso de parâmetros de corrente pulsada na soldagem molhada com eletrodo revestido

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de Manufatura e Materiais

Linha de Pesquisa: Processo de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias

Coorientador: Prof. Dr. Regis Henrique Gonçalves e Silva

Belo Horizonte

2024

C348e

Castellanos Gonzalez, Orlando Mauricio.

Estudo do efeito do uso de parâmetros de corrente pulsada na soldagem molhada com eletrodo revestido [recurso eletrônico] / Orlando Mauricio Castellanos Gonzalez. – 2024.

1 recurso online (124 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Ariel Rodriguez Arias.

Coorientador: Regis Henrique Gonçalves e Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 83-124.

Bibliografia: f. 72-82.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Arco de soldagem submersa - Teses. 3. Eletrodos - Teses. 4. Soldagem subaquática - Teses. 5. Estabilidade – Teses. I. Rodríguez Arias, Ariel. II. Silva, Regis Henrique Gonçalves e. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

***ESTUDO DO EFEITO DE PARÂMETROS DE CORRENTE
PULSADA NA SOLDAGEM MOLHADA COM ELETRODO
REVESTIDO***

ORLANDO MAURICIO CASTELLANOS GONZALEZ

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Ariel Rodriguez Arias (Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva (Coorientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFSC), Dr. Alexandre Queiroz Bracarense (Professor aposentado - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Valter Rocha dos Santos (Consultor técnico do Departamento de Engenharia Química e de Materiais/PUC RJ) e Dr. Ezequiel Caires Pereira Pessoa (Departamento de Soldagem e Materiais/Le Tourne University), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **"Mestre em Engenharia Mecânica"**, na área de concentração de **"Engenharia de Manufatura e Materiais"**.

Dissertação aprovada no dia 27 de fevereiro de
2024. Por.



Documento assinado eletronicamente por **Ariel Rodriguez Arias, Chefe de departamento**, em 04/03/2024, às 15:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Regis Henrique Goncalves e Silva, Usuário Externo**, em 05/03/2024, às 15:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Queiroz Bracarense, Membro**, em 06/03/2024, às 15:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ezequiel Caires Pereira Pessoa, Usuário Externo**, em 06/03/2024, às 15:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Valter Rocha dos Santos, Usuário Externo**, em 12/03/2024, às 12:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site



https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3056435** e o código CRC **98711544**.

*Aos meus pais e os meus irmãos pelo amor, paciência e compreensão.
Aos pesquisadores que ajudam ao desenvolvimento do mundo*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecer ao criador, por dar-me o mais importante neste caminho: família, saúde e amor pelo conhecimento.

Ao meu Orientador prof. Dr. Ariel Rodriguez pelos ensinamentos repassados e o apoio recebido. Obrigado pela disposição e oferecer toda a estrutura do LRSS.

Ao meu co-orientador prof. Dr. Régis Gonçalves, pela disposição para a discussão dos resultados obtidos.

Ao Andrés, por ter me ensinado a paixão pela soldagem, repassada também por todos os seus anteriores tutores. Ao Eduardo por ter compartilhado comigo esse tempo no mestrado. Agradeço especialmente vocês por termos passado juntos as dificuldades e alegria neste processo.

À a minha família, amigos na Colômbia. À equipe do Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação, pelo auxílio em cada etapa da pesquisa

À Raissa, Daniel, Thales e João, por me permitir ajudá-los nos seus TCC e ter intercambiado conhecimento.

A todos os meus amigos de BH e da UFMG, pelo companheirismo.

À banca examinadora, por terem aceito acompanhar de perto este projeto com suas sugestões e recomendações.

A CAPES e CNPQ pelo incentivo e apoio financeiro à nossa pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – com Código de Financiamento 001.

RESUMO

A finalidade deste trabalho é a compreensão do uso da corrente pulsada na soldagem molhada com eletrodo revestido. A técnica de soldagem molhada é amplamente utilizada na indústria offshore como auxílio nos trabalhos de reparo. Portanto, o estudo das características operacionais e dos problemas inerentes é de grande importância para os pesquisadores na área. Além disso, o processo SMAW ainda é a técnica dominante empregada devido ao seu custo razoável, qualidade adequada do metal de solda e simplicidade de operação. Nesse sentido, o presente trabalho compreende a execução de soldas com uma fonte que permite o controle eletrônico da corrente, aplicando modulação da corrente em forma de onda pulsada, mantendo a mesma corrente média. Além disso, foram simuladas as profundidades de 0,4 m e 30 m; sendo utilizadas a polaridade direta e inversa. Como principais resultados, obtiveram-se maiores valores médios de taxa de fusão e penetração máxima do cordão de solda com o incremento da corrente eficaz. No entanto, um arco rígido devido a estabilidade na menor amplitude de corrente (menor valor médio de corrente eficaz), também aumentou a profundidade de penetração. Adicionalmente, uma maior frequência de pulso permitiu equalizar o sinal de tensão do arco, com a finalidade de melhorar a estabilidade do processo.

Palavras chave: Soldagem subaquática, eletrodo revestido, SMAW, corrente modulada, corrente pulsada, penetração do cordão de solda, estabilidade do processo, taxa de fusão.

ABSTRACT

The purpose of this work is to understand the use of pulsed current in underwater wet welding with a stick electrode. The wet welding technique is widely used in the offshore industry as an aid to repair work. Therefore, the study of the operational characteristics and inherent problems is of great importance to researchers in the area. In addition, the SMAW process is still the dominant technique used due to its reasonable cost, adequate weld metal quality and ease of application. In this sense, the present work includes the execution of welds with a power source that allows electronic control of the current, applying current modulation to pulsed waveform, maintaining the same average current. Depths of 0.4 m and 30 m were simulated, using direct and reverse polarity. The main results were higher average melting rates and maximum penetration of the weld bead as the effective current increased. However, a rigid arc, due to its stability at a lower current amplitude (lower average effective current value), was also able to increase the depth of penetration. In addition, a higher pulse frequency made it possible to equalize the arc voltage signal in order to improve the stability of the process.

Key words: Underwater wet welding, underwater welding, coated electrode, SMAW, modulated current, pulsed current, weld bead penetration, process stability, melting rate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Métodos utilizados na soldagem subaquática.	23
Figura 2	Ciclogramas de potência para eletrodos rutilico, básico e oxidante	25
Figura 3	Desvio padrão da tensão para 1,5; 3 e 6 metros de profundidade	26
Figura 4	Variação em peso do Mn e Si com a profundidade	27
Figura 5	Variação do hidrogênio difusível com a profundidade	28
Figura 6	Relação entre o Hd e Hw com a corrente soldagem, espessura do metal de base e o aporte de calor.	30
Figura 7	Teor de hidrogênio difusível medido para eletrodos ferrítico e austenítico	31
Figura 8	Efeito da pressão hidrostática na porosidade do metal de solda	33
Figura 9	Resultados do ensaio de dobramento e quantificação da porosidade dos corpos de prova obtidos com o eletrodo E6013 a 50 e 100 m de profundidade.	34
Figura 10	Seções longitudinais de cordões sobre chapa em 75 m de profundidade. (a) e (b) com corrente constante. (c) com corrente pulsada.	35
Figura 11	Caraterização da transferência globular repelida de ângulo obtuso na soldagem molhada com arame tubular.	36
Figura 12	Transferência globular repelida na soldagem molhada com arame tubular. (a) ângulo obtuso (b) ângulo agudo.	37
Figura 13	Fonte de soldagem submarina HipER-1	39
Figura 14	Esquema representativo utilizado na aquisição de dados	40
Figura 15	Esquema representativo da câmara hiperbárica	41
Figura 16	Detalhe do sistema de soldagem por gravidade	41
Figura 17	Bancada experimental para a produção de soldas molhadas	44
Figura 18	Tempo de soldagem e amostragem dos oscilogramas de tensão e corrente	46

Figura 19	Valor de corte dinâmico utilizado nos experimentos de MORENO-URIBE (2020) para DCEN dependendo da profundidade.	46
Figura 20	Fluxograma utilizado na obtenção dos modelos explicativos	49
Figura 21	Relação entre os valores de corrente eficaz medidos para cada amplitude de corrente	52
Figura 22	Médias ajustadas obtidas para a taxa de fusão. Interação entre polaridade e profundidade.	53
Figura 23	Médias ajustadas obtidas para a taxa de fusão. Interação entre amplitude de corrente e frequência de pulso.	54
Figura 24	Médias ajustadas. Efeito da polaridade, profundidade e taxa de fusão na tensão do arco.	55
Figura 25	Médias ajustadas obtidas para DPU. Interação entre amplitude de corrente e frequência de pulso.	56
Figura 26	Teste 22 – Esquema que mostra a dinâmica da tensão do arco em função da corrente de pulso	57
Figura 27	Teste 40. Esquema que mostra o efeito do aumento da frequência de pulso nos picos (setas azuis) e quedas (setas verdes) da tensão do arco	58
Figura 28	Médias ajustadas obtidas para DPU. Interação entre frequência de pulso e profundidade	59
Figura 29	Gráfico do efeito da polaridade no desvio padrão da tensão	60
Figura 30	Gráficos de contorno para a penetração máxima do cordão de solda. Interação entre profundidade e polaridade	61
Figura 31	Gráficos de contorno para a penetração máxima do cordão de solda. Interação entre amplitude de corrente e frequência de pulso	63
Figura 32	Médias ajustadas. Gráfico de efeito da profundidade e tensão do arco na largura do cordão de solda	64
Figura 33	Gráfico de efeito da penetração máxima e largura na área de penetração do cordão de solda	65
Figura 34	Penetração máxima, largura e área de penetração na soldagem molhada	65

Figura 35	Cordões de solda obtidos com corrente pulsada na polaridade inversa em 0,4 m	
Figura 36	Cordões de solda obtidos com corrente pulsada na polaridade direta em 0,4 m	67
Figura 37	Relação entre o valor médio de I_{cc} e a qualidade superficial dos cordões obtidos em 0,4 m	67
Figura 38	Cordões de solda obtidos com corrente pulsada na polaridade inversa em 30 m	67
Figura 39	Relação entre a tensão do arco e a qualidade dos cordões de solda	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição do metal de solda (%P/P)	27
Tabela 2	Composição química do eletrodo revestido (%P/P)	38
Tabela 3	Composição química do aço AH36 (%P/P)	38
Tabela 4	Fatores principais e níveis do experimento	43
Tabela 5	Dados coletados do comportamento elétrico e caracterização da geometria do cordão de solda.	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SMAW	Shielded Metal Arc Welding
FCAW	Flux Cored Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
ZF	Zona fundida
ZTA	Zona termicamente afetada
LA	Lâmina de água
DCEP	Corrente contínua com eletrodo positivo, também CC+ ou EP
DCEN	Corrente contínua com eletrodo negativo. Também CC- ou EN
AC	Corrente alternada
O ⁺	Cátion oxônio
OH ⁻	Ânion Hidroxilo
I _{cc}	Índice de curto circuito
%P/P	Porcentagem em peso
P	Penetração máxima na seção transversal do cordão de solda em mm
L	Largura na seção transversal do cordão de solda em mm
AP	Área de penetração em mm ²
Tf	Taxa de fusão em mm/s
KvU	Coefficiente de variação da tensão do arco
U	Tensão do arco em V
DPU	Desvio padrão da tensão do arco em V
I _p	Corrente de pulso em A
I _b	Corrente de base em A
I _m	Corrente média em A
I _{rms}	Corrente eficaz em A
RLM	Regressão Linear Múltipla

VIF	Fator de inflação da Variância
R^2	Fator de determinação
r	Coefficiente de correlação de Pearson
GL	Grau de Liberdade
ANOVA	Análise de Variância
SQ seq	Suma de quadrados da sequência
SQ (Aj.)	Suma de quadrados ajustado
QM (Aj.)	Quadrado médio ajustado
IC	Intervalo de confiança
Coef	Coefficiente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivos.....	19
1.1.1 Objetivo Geral.....	19
1.1.2 Objetivos Específicos.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Soldagem Subaquática.....	21
2.2 Problemas inerentes na soldagem molhada.....	22
2.2.1 Estabilidade do processo.....	22
2.2.2. Perda de elementos de liga.....	25
2.2.3 Hidrogênio difusível.....	27
2.2.4 Porosidade em soldas molhadas.....	31
2.3 Corrente pulsada e sua aplicação na soldagem.....	33
2.4. Regressão linear múltipla.....	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 Materiais.	37
3.1.1 Eletrodo revestido e metal de base.....	37
3.2 Equipamentos.....	38
3.2.1 Fonte de soldagem e esquema de aquisição de dados.....	38
3.2.2 Câmera hiperbárica e sistema de soldagem.....	40
3.3 Desenho experimental.....	41
3.4 Procedimento para a realização das soldas.....	42
3.5 Dados experimentais.....	43
3.5.1 Comportamento elétrico.....	44
3.5.2 Morfologia do cordão.....	45
3.6 Análise de regressão.....	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 Dados coletados.....	49

4.2 Definição do Comportamento elétrico.....	51
4.3 Definição da morfologia do cordão de solda.....	59
4.4 Inspeção visual.....	65
5. CONCLUSÃO.....	68
6 REFERÊNCIAS.....	72
APÊNDICES.....	83

1 INTRODUÇÃO

Plataformas semissubmersíveis ancoradas no fundo do mar permitem a perfuração do relevo oceânico com a finalidade de realizar exploração e processamento de petróleo e gás. Além disso, os avanços tecnológicos viabilizaram a instalação e manutenção de unidades flutuantes que permitem a geração de energia eólica. Essas estruturas em alto mar demonstram importância para o desenvolvimento dos países que possuem a sua grande riqueza. No entanto, as estruturas offshore estão expostas a danos em decorrência do ambiente onde elas operam. Fissuras devido a cargas cíclicas, trincas por hidrogênio, explosões, acidentes com navios e degradação devido a corrosão são de extensa preocupação para a indústria. Em vista disso, a inspeção e manutenção torna-se necessária. Uma das técnicas que auxilia no reparo dessas estruturas é a soldagem molhada. Em comparação com a soldagem seca, a soldagem molhada permite a obtenção de juntas com geometrias complexas, sem a necessidade do uso de câmeras hiperbáricas e sistemas de vedação que aumentam o custo e o tempo dos trabalhos de reparo. O processo SMAW ainda é utilizado devido a versatilidade e simplicidade de operação. Contudo, problemas inerentes ao contato direto com a água e a pressão de trabalho são de grande interesse na área. Instabilidade, perda de elementos de liga, fissuração a frio e porosidade são os problemas mais discutidos na literatura. No decorrer do século XXI, o LRSS têm sido pioneiros de pesquisas enquadradas no âmbito da tecnologia da soldagem molhada, sendo investigadas as linhas de desenvolvimento de consumíveis e de parametrização das variáveis envolvidas, com o intuito de avaliar os índices de estabilidade do arco elétrico e sua aplicação. Estudos compreendendo a análise do teor de hidrogênio difusível mediante cromatografia gasosa e a sua relação direta com a suscetibilidade de fissuração a frio. Além disso, avaliação do comportamento operacional e seu efeito na morfologia no cordão de solda e na eficiência de consumo do eletrodo revestido. Também foram realizados estudos relacionados com o nível de porosidade, avaliação da resistência mecânica das soldas molhadas e os microconstituintes formados. Inclusive, têm encarado pesquisas aplicando o processo FCAW na soldagem molhada, demonstrando o potencial tecnológico que significa o emprego do arame tubular em termos de produtividade em comparação com a técnica SMAW. De maneira concomitante, outro dos institutos de

referência mundial, o LABSOLDA, em parceria com diversas instituições têm liderado pesquisas relacionadas com a inovação de processos e estruturação de variados arquétipos de fontes eletrônicas que permitem, por exemplo, o controle da cadência do destacamento das gotas na transferência por curto circuito empregando arame maciço, entendimento dos aspectos operacionais do emprego de fontes operando em AC para o melhoramento do desempenho do processo GMAW, comportamento dinâmico de efeitos de processo para soldagem SMAW subaquática molhada, explorações de automação em soldagem subaquática molhada, entre outros. Nesse contexto, no começo do século, surgiu uma pesquisa entre o LABSOLDA e a Petrobras na área de soldagem molhada, culminando na fabricação da fonte HipER-1 (BERNARDI, 2018). Dentre as funcionalidades oferecidas pela fonte de soldagem HipER-1, o atual projeto pretende o estudo da onda retangular de corrente pulsada e sua aplicabilidade no ambiente molhado. Esta ideia parte fundamentalmente da oportunidade tecnológica de poder usufruir de uma fonte especializada para fazer investigações na área, somado também ao grande "Know-how" na colaboração conjunta entre as equipes do LRSS e LABSOLDA mencionado anteriormente. Além disso, a pouca abordagem na literatura relacionada ao uso de corrente pulsada na soldagem molhada e a falta de entendimento do comportamento operacional torna interessante a pesquisa desenvolvida.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o desempenho de parâmetros de corrente pulsada no comportamento operacional da técnica de soldagem subaquática molhada com eletrodo revestido e de seus efeitos sobre a solda.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar o efeito da mudança nos níveis de amplitude de corrente, frequência de pulso, profundidade e polaridade no comportamento elétrico de processo.

- Estudar o efeito da mudança nos níveis de amplitude de corrente, frequência de pulso, profundidade e polaridade na morfologia do cordão de solda.

- Avaliar o efeito da interação entre os fatores principais e o uso de variáveis resposta, que também permitam definir o comportamento elétrico do processo e a morfologia do cordão de solda.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Soldagem Subaquática

Segundo TOMKÓW e JANECZEK (2019) existem três métodos utilizados para executar soldagem em ambiente aquático: soldagem seca, soldagem com câmara local seca e soldagem molhada (Ver Figura 1). A soldagem seca é o método mais custoso devido a que é preciso a construção e adaptação de câmaras especiais que isolem o soldador e o metal de solda da água circundante. Além disso, dependendo da pressão, este método pode ser realizado à pressão atmosférica ou na profundidade de operação. Na soldagem com câmara local seca é utilizada uma tocha especial que permite adicionar uma atmosfera de gás que protege a junta a ser soldada (FYDRYCH e ROGALSKI, 2013). Por outro lado, a soldagem molhada é executada com o arco em contato direto com a água. Esta técnica permite maior liberdade de movimento e facilidade para ser empregada (não há necessidade de encapsular a região a ser soldada). Por conseguinte, é mais econômica e operacionalmente eficiente em comparação com a soldagem a seco (NIXON e BILLINGHAM, 1987). LABANOWSKI et al. (2008) explicam que, o calor gerado pelo arco elétrico desassocia a molécula de água em H^+ e OH^- . Esse fator, junto com a alta taxa de resfriamento, ocasiona diferentes problemas metalúrgicos, tais como: poros, microestrutura de alta dureza e trincas a frio (trincas por hidrogênio). Além disso, existe baixa visibilidade do arco e o aumento da instabilidade do processo.

O processo SMAW tem demonstrado sua efetividade e versatilidade para ser empregado nestes trabalhos de manutenção. Do mesmo modo, tem se estudado o arame tubular como alternativa, devido a altas taxas de deposições reportadas em comparação com o processo SMAW (MORENO-URIBE e MODENESI, 2022). Também, a versatilidade do arame tubular permite a modificação da composição química do fluxo, com o intuito de obter metais de solda com características especiais. Todavia, o uso do processo FCAW é limitado pela falta de equipamento comercialmente disponível (KLETT et al., 2020a).

Figura 1 - Métodos utilizados na soldagem subaquática.



Fonte: (TOMKÓW e JANECEK, 2019)

2.2 Problemas inerentes na soldagem molhada

2.2.1 Estabilidade do processo

Segundo diferentes autores, a estabilidade do arco elétrico na soldagem molhada pode estar associada a:

- Facilidade de manuseio por parte dos soldadores mergulhadores (NIXON e GRAHAM, 1993).
- Aspecto visual do cordão. (MAZZAFERRO e MACHADO, 2008).
- Quantidade de respingos gerados (MENDONÇA, 2019).
- Índices de estabilidade indicativos de alta flutuação dos sinais de tensão e corrente de soldagem (MORENO-URIBE et al., 2017).

- Transferência metálica através de filmagem de alta velocidade (No caso do processo FCAW) e sua relação com a dinâmica das bolhas (FENG et al., 2017).
- Comportamento físico-químico da escória.
- Combinação entre os conceitos supracitados.

No caso do processo SMAW, a literatura destaca o uso de índices de estabilidade e a análise da flutuação da tensão e corrente. MORENO-URIBE et al. (2017) utilizaram o coeficiente de variação da tensão com a finalidade de determinar a estabilidade do processo. Este índice, que resulta da razão entre o desvio padrão da tensão e do valor da tensão do arco, permite analisar a dispersão em termos relativos em relação à média (CASTELLANOS-GONZALEZ et al., 2021). Os autores concluíram que o consumível rutilico apresentou maior estabilidade na polaridade inversa ao ar e em 10 m de profundidade. Já para eletrodo oxidante, houve maior estabilidade em DCEP do que em DCEN na soldagem atmosférica, mas o comportamento se inverteu quando a profundidade aumentou de 5 para 10 m. Adicionalmente, KHAN et al. (2015) baseados nos oscilogramas de tensão, concluíram que os eletrodos rutilicos apresentam melhor desempenho operacional que os oxidantes e básicos.

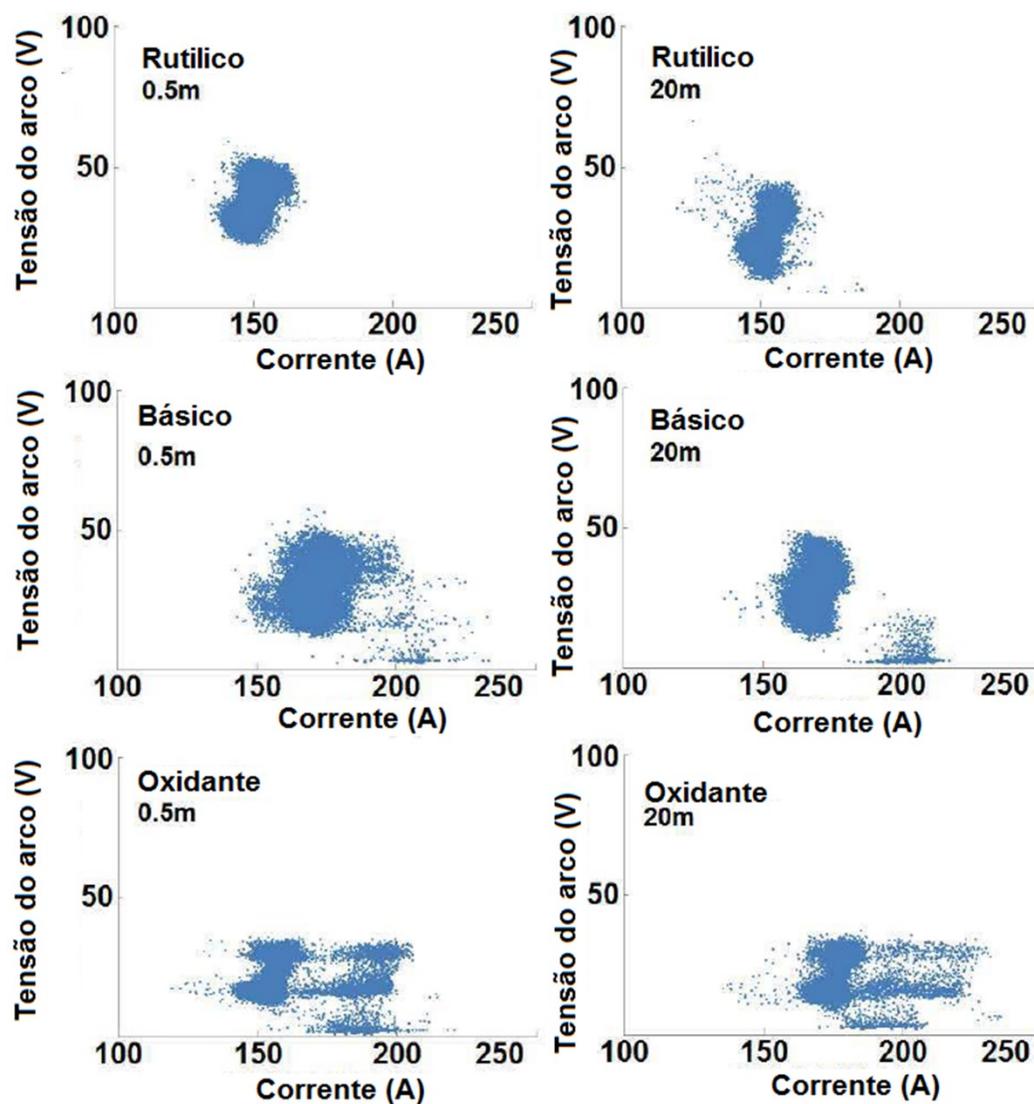
PESSOA et al. (2010) estudaram o comportamento operacional de eletrodos de base rutilica, básica e oxidante nas profundidades de 0,5 e 20 m. Em primeira instancia, os autores observaram que o aumento da profundidade impactou negativamente a aparência superficial dos cordões produzidos com eletrodos básico e oxidante. No entanto, notaram que o metal de solda obtido com eletrodo rutilico apresentou um formato mais favorável. Além disso, os autores relacionaram uma maior tensão do arco com a ocorrência de transferência globular, a qual incrementou a porosidade superficial em função de poros acumulados nas gotículas projetadas à poça de fusão. Adicionalmente, determinaram que o número de curtos circuitos e o índice de Madatov, por si só, não são suficientes indicadores da estabilidade do processo.

Por tanto, usaram ciclogramas de potência com a finalidade de entender os resultados apresentados. Na Figura 2 mostra-se que o eletrodo rutilico com uma menor área de dispersão de pontos de potência apresenta maior estabilidade do que o eletrodo oxidante (maior dispersão de pontos).

NIXON e GRAHAM (1993), APUD PESSOA et al. (2010), estudaram a estabilidade do processo até 6 m de profundidade, com base na redução do desvio padrão da tensão do

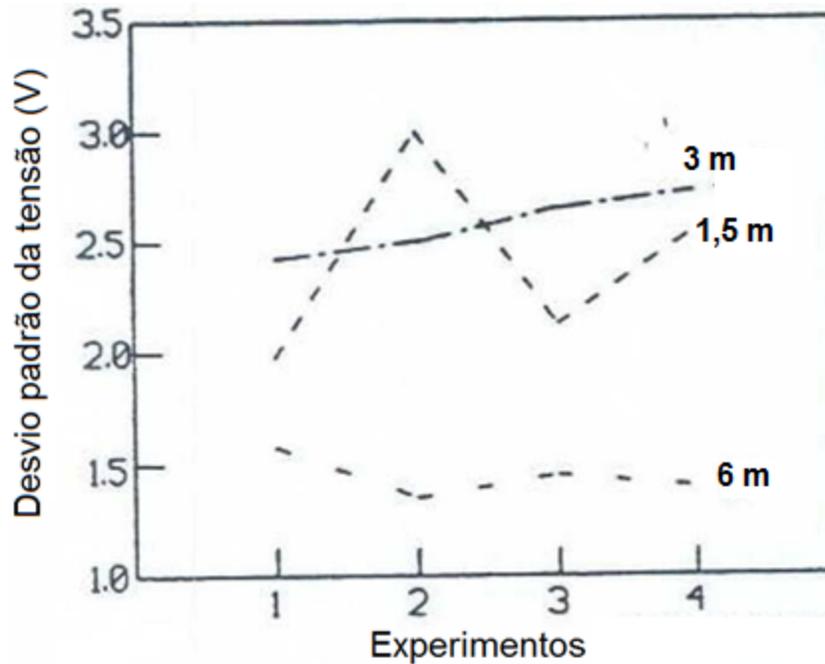
arco. A estabilidade do arco elétrico melhorou substancialmente a uma profundidade de 6 metros, em comparação com 1,5 e 3 metros (Ver Figura 3). Além disso, os autores registraram que os soldadores mergulhadores relataram uma maior facilidade no manuseio do eletrodo e uma melhora no formato de cordão de solda na maior profundidade.

Figura 2 – Ciclogramas de potência para eletrodos rutilico, básico e oxidante



Fonte: (PESSOA et al., 2010)

Figura 3 – Desvio padrão da tensão para 1,5; 3 e 6 metros de profundidade



Fonte: (NIXON e GRAHAM, 1993)

2.2.2. Perda de elementos de liga

O oxigênio presente na atmosfera do arco tem demonstrado ser um fator importante da redução de elementos de liga no metal de solda. BRACARENSE et al. (2009), desenvolveram um estudo no qual testaram distintos eletrodos comerciais, compreendido por um eletrodo oxidante A e quatro eletrodos rutilicos B, C, D e E. Na Tabela 1 mostra-se a composição do metal de solda. Nota-se que a quantidade de Mn e Si no metal de solda reportado para o eletrodo A são baixíssimos, em comparação com o registro com os eletrodos rutilicos. Os autores concluíram que um excesso de oxigênio livre reagiu com esses elementos desoxidantes, diminuindo a sua participação no metal de solda. Além disso, os autores explicam que as grandes quantidades de inclusões também contribuíram. Essas inclusões mostraram altas quantidades de óxido de ferro na sua composição. Em consequência, houve um detrimento das propriedades mecânicas, apresentando-se menor limite de escoamento, tensão de ruptura, dureza e tenacidade.

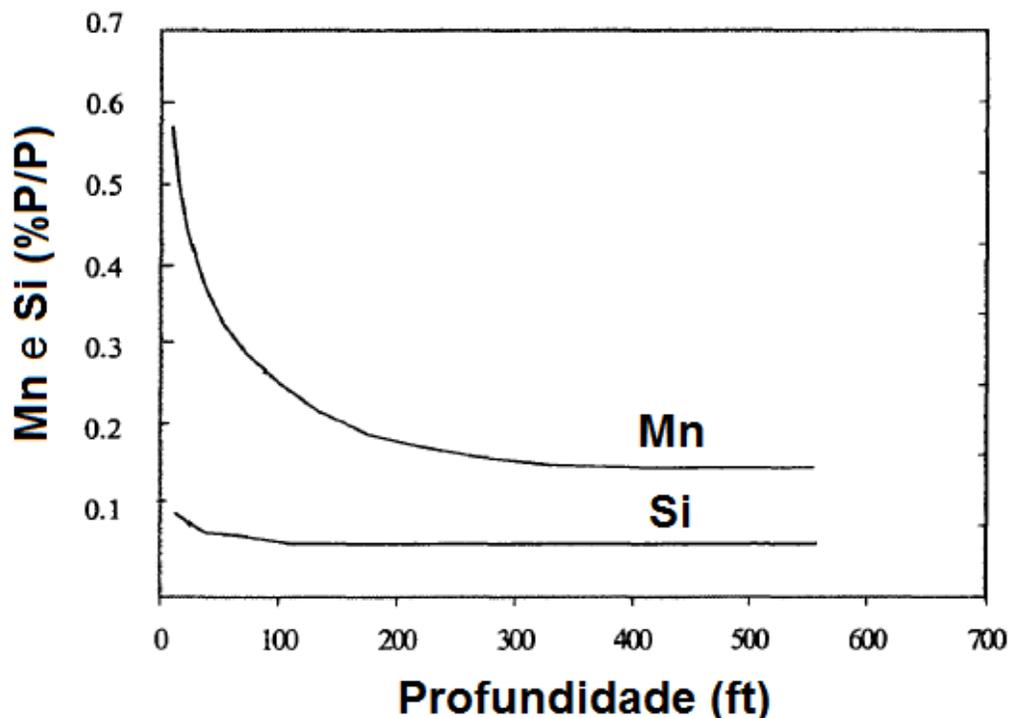
Tabela 1 – Composição do metal de solda (%P/P)

Eletrodo	Mn	Si	Ti	P	S	C	Ni	Cr	V	Cu	Mo
A	0,033	0,010	0,000	0,015	0,007	0,055	2,020	0,000	0,000	0,034	0,000
B	0,501	0,309	0,018	0,020	0,012	0,087	0,055	0,054	0,019	0,119	0,000
C	0,513	0,384	0,015	0,014	0,009	0,070	0,069	0,051	0,017	0,044	0,000
D	0,609	0,370	0,013	0,025	0,008	0,075	0,036	0,027	0,024	0,020	0,440
E	0,343	0,199	0,011	0,026	0,007	0,090	0,026	0,014	0,013	0,024	0,000

Fonte: (BRACARENSE et al., 2009)

LIU et al. (1990) explicam que o teor de Mn e Si no metal de solda também diminui com a profundidade, sendo ilustrado na Figura 4. Até 300 pés (91 m) acontece uma perda de manganês de aproximadamente 0,40 %P/P. Já, o teor de Si altera-se levemente nos primeiros 100 pés, para posteriormente ficar estável em maiores profundidades.

Figura 4 - Variação em peso do Mn e Si com a profundidade



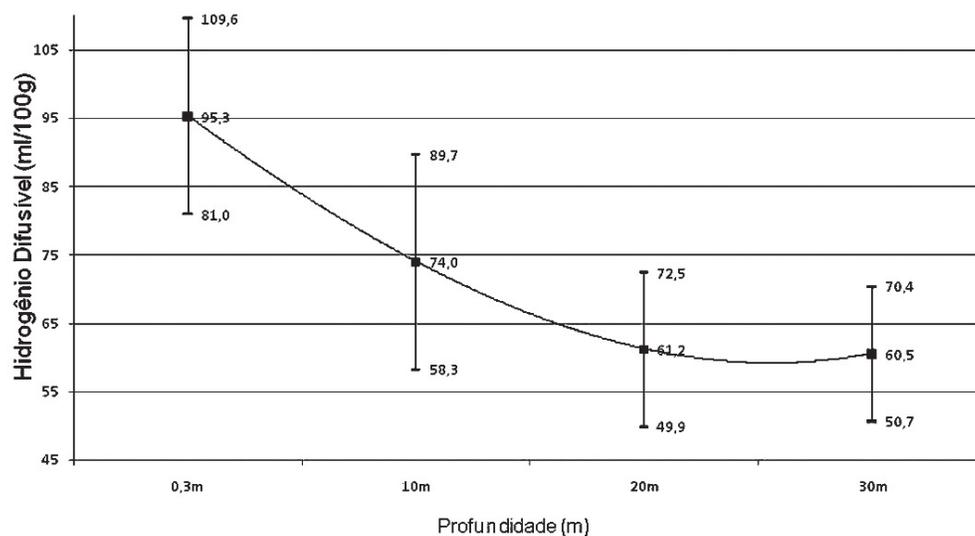
Fonte: (LIU et al., 1990)

2.2.3 Hidrogênio difusível

Durante o processo de soldagem molhada, o hidrogênio proveniente do revestimento do eletrodo, partículas de sujeira e da dissociação da molécula de água; pode difundir-se no metal de solda (CHENG et al., 2014). Conforme indicado por BAILEY et al. (1993), o teor de hidrogênio na atmosfera do arco facilita a sua difusão enquanto a poça de fusão se resfria rapidamente. Esses fatores, combinados simultaneamente com altas tensões e uma microestrutura susceptível (geralmente martensita), contribuem ao surgimento de trincas a frio (PAYÃO, 2003).

DA SILVA et al. (2012) mediram o hidrogênio difusível mediante cromatografia gasosa de cordões de solda depositados por um eletrodo rutilico comercial, nas profundidades de 0,30; 10; 20 e 30 metros, conforme mostrado na Figura 5. Em geral, o teor de hidrogênio difusível é inversamente proporcional à profundidade. Quando aumentou a profundidade de 0,3 para 10 m, o hidrogênio difusível diminuiu 25%, que por sua vez diminuiu 16% até os 20 m. Não obstante, os resultados obtidos para a profundidade de 30 m não foram estatisticamente diferentes dos resultados obtidos para a profundidade de 20 m. Isso significa que o hidrogênio difusível provavelmente atinge um nível constante para pressões de 20 m (estabilização), o que também é afirmado por IBARRA et al. (1994).

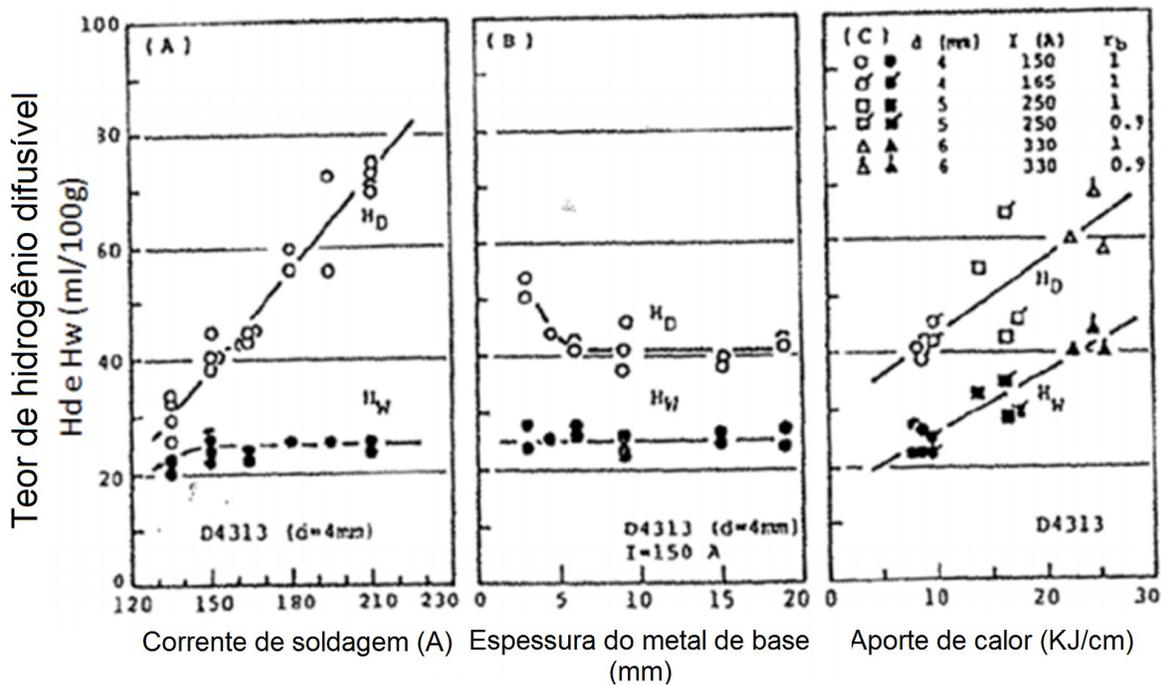
Figura 5 - Variação do hidrogênio difusível com a profundidade



Fonte: (DA SILVA et al., 2012)

SUGA (1985) estudou a relação do hidrogênio difusível com parâmetros do processo. Os eletrodos utilizados foram Ilmenita (D4301), cal-titânia (D4303), celulósica (D4311), óxido de alto titânio (D4313) e óxido de ferro-ferro (D4327), com diâmetros nominais de 4 e 6 mm e em DCEN. Foi mensurado o hidrogênio difusível em relação ao metal depositado (H_d - hidrogênio difusível por 100 g de material depositado) e também em relação ao metal de solda (H_w - hidrogênio difusível por 100 g de metal de solda). Na Figura 6, pode-se observar a uma relação linearmente proporcional entre H_d e a corrente de soldagem. Nesse caso, a espessura do metal de base influencia o teor de hidrogênio difusível somente para espessuras de metal de base inferiores a 5 mm, proporcionando um aumento do hidrogênio difusível do metal de solda depositado com a redução da espessura do metal de base. Adicionalmente, evidencia-se uma correlação positiva ao aporte de calor, também se observou que o H_d e o H_w apresentaram uma correlação positiva entre o aporte de calor com H_w e H_d . O autor comenta que o aumento da corrente de soldagem implica uma maior taxa de fusão do eletrodo, o que se traduz em uma maior velocidade de soldagem. Esse aumento da velocidade de soldagem resulta em taxas de resfriamento mais altas para o metal de solda solidificado. Portanto, tem menos tempo para o hidrogênio se difundir do metal de solda solidificado, o que proporciona valores mais altos de hidrogênio difusível com o aumento da corrente de soldagem. KLETT et al. (2020b) também estudaram o efeito dos parâmetros do processo no hidrogênio difusível. Os autores evidenciaram uma tendência à redução do teor de hidrogênio difusível com o aumento da profundidade. Além disso, a tensão do arco (comprimento do arco) e a corrente de soldagem apresentaram uma correlação positiva com o teor de hidrogênio difusível. Correntes mais altas levam a uma maior entrada de energia. Por tanto, resultam em uma quantidade maior de água dissociada. Arcos mais longos levam a colunas de arco maiores e a temperaturas de arco mais altas. Por conseguinte, mais água fica em contato com o arco e pode se dissociar. Ambos levam a um aumento do hidrogênio difusível no metal de solda. Adicionalmente, a alteração do teor de celulose do revestimento do eletrodo levou a teores de hidrogênio difusível ligeiramente mais altos, independentemente da profundidade da água. Isso é explicado pelo hidrogênio contido na celulose.

Figura 6 – Relação entre o H_D e H_W com a corrente soldagem, espessura do metal de base e o aporte de calor.

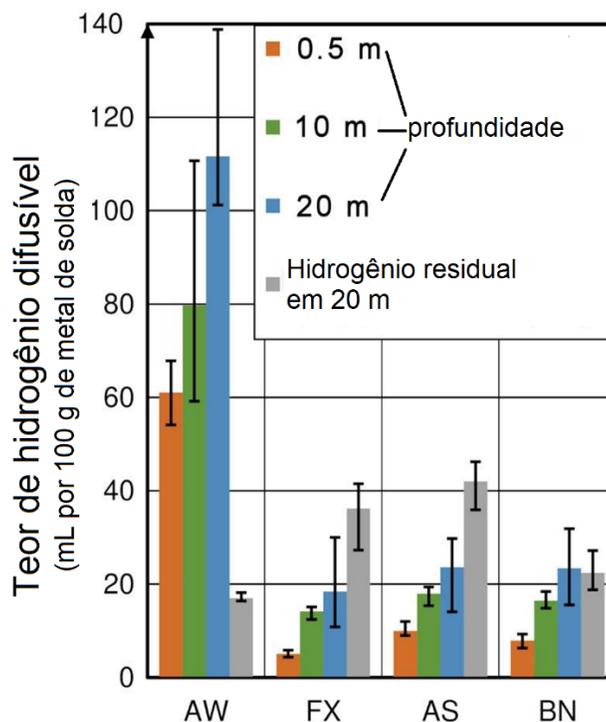


Fonte: (SUGA, 1985)

CAMPOS et al. (2021) sugerem modificar a composição química dos consumíveis usados no processo como uma estratégia para mitigar o teor de hidrogênio difusível. OZAKI et al. (1977) mencionam que os problemas causados pelo hidrogênio são menores em aços com carbono equivalente inferior a 0,4%. Todavia, os metais de solda com microestrutura austenítica mostram-se mais adequados para aços com carbono equivalente superior a 0,4%. O hidrogênio tem maior solubilidade no metal de solda austenítico em comparação com a solubilidade apresentada no metal de solda ferrítico. Nesse sentido, a matriz austenítica é favorável para evitar que o hidrogênio provoque trincas no metal de base susceptível. KLETT e HASSEL (2020) notaram que a maior redução no teor de hidrogênio difusível pode ser obtida ao utilizar o eletrodo austenítico Finox 4519 AC (FX). Comparando com a soldagem realizada com o eletrodo ferrítico Aquaweld (AW), foi registrada uma redução de 92% (0,5 m), 82% (10 m) e 85% (20 m) no teor de hidrogênio difusível. Adicionalmente, em 0,5 m de profundidade da água o teor médio de hidrogênio difusível de todas as soldas austeníticas foi inferior a 10 ml/100 g de metal de solda. Em 10 m de profundidade de água, foram alcançadas

médias abaixo de 20 ml/100 g de metal de solda e, em 20 m de profundidade de água, valores médios inferiores de 25 ml/100 g de metal de solda (Ver Figura 7).

Figura 7 – Teor de hidrogênio difusível medido para eletrodos ferrítico e austenítico



Fonte: (KLETT e HASSEL, 2020)

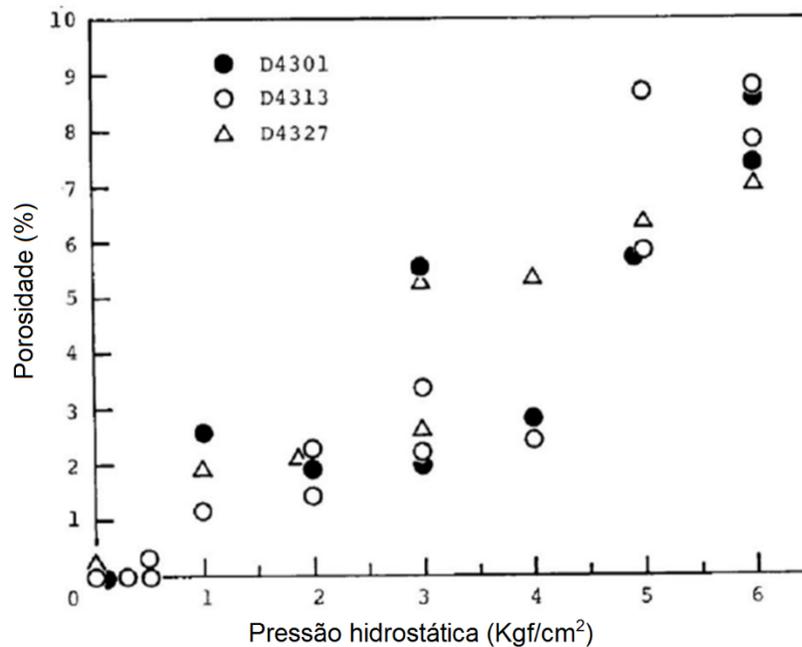
SANTOS et al. (2012), descreveram o desenvolvimento experimental de um eletrodo de oxi-rutilico E70XX com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas do metal de solda e minimizar o teor de hidrogênio difusível, em comparação com os consumíveis comerciais existentes. Além disso, foram adicionados níquel e molibdênio para melhorar as propriedades mecânicas do metal de solda. Como resultado, o teor de hidrogênio difusível de aproximadamente 20 ml/100 g foi obtido no desenvolvimento de eletrodos do tipo oxi-rutilico, sendo aproximadamente equivalente ao teor dos eletrodos oxidantes típicos e consideravelmente menor do que o teor apresentado no metal de solda depositado com eletrodos do tipo rutilico. Conseqüentemente, obteve-se baixa porosidade e ausência de microtrincas no metal de solda, além de melhor a soldabilidade operativa em relação ao eletrodo oxidante comercial. Além disso, os eletrodos desenvolvidos apresentaram menor porosidade e desempenho superior em termos de resistência (energia Charpy) e ductilidade

(alongamento). Nesse contexto, POPE e LIU (1996) observaram que a adição de hematita no revestimento do eletrodo reduziu significativamente o hidrogênio difusível na soldagem molhada. Portanto, é razoável supor que o hidrogênio difusível mais baixo associado aos eletrodos oxidantes se deve a algum processo que ocorre durante ou antes da solidificação do metal de solda. Isso poderia ser explicado pela maior quantidade de oxigênio na atmosfera do arco elétrico dos eletrodos oxidantes, que causa a oxidação de parte do hidrogênio presente no arco elétrico, reduzindo assim a absorção desse elemento no metal de solda líquido. Os autores detectaram FeO somente na ponta fundida dos eletrodos oxidantes. Assim, uma camada de FeO pode ser responsável pelo menor teor de hidrogênio do metal de solda depositado com os eletrodos oxidantes (FERREIRA et al., 2010).

2.2.4 Porosidade em soldas molhadas

A porosidade no metal de solda é um dos defeitos mais comuns em todos os processos de soldagem (TREVISAN, 1990), sendo um dos principais problemas na soldagem subaquática. O resfriamento e solidificação da poça na soldagem molhada é muito mais rápido em comparação com o processo executado ao ar. Nesse sentido, este fenômeno impede que as bolhas de gás geradas escapem rapidamente. Em consequência, as bolhas ficam retidas na solidificação do metal e formam os poros (WATSON, 1994). Um estudo realizado por SUGA e HASUI (1986) permitiu estabelecer a relação proporcional entre a pressão hidrostática e a porosidade. Evidenciou-se que os poros surgiram a partir de uma profundidade de 5 m, conforme mostrado na Figura 8. No entanto, os autores também relataram que a ausência de porosidade em soldas produzidas em profundidades inferiores a 5 m ($0,5 \text{ kgf/cm}^2$) pode estar relacionada ao baixo teor de hidrogênio, que não é suficiente para promover o crescimento de poros. ANDRADE et al. (2010) e PESSOA (2007), sugerem que a transferência metálica influencia na nucleação dos poros. Quando aumenta a quantidade de curtos circuitos, existe uma maior absorção de CO no metal de solda, o que acrescenta a porosidade do metal de solda.

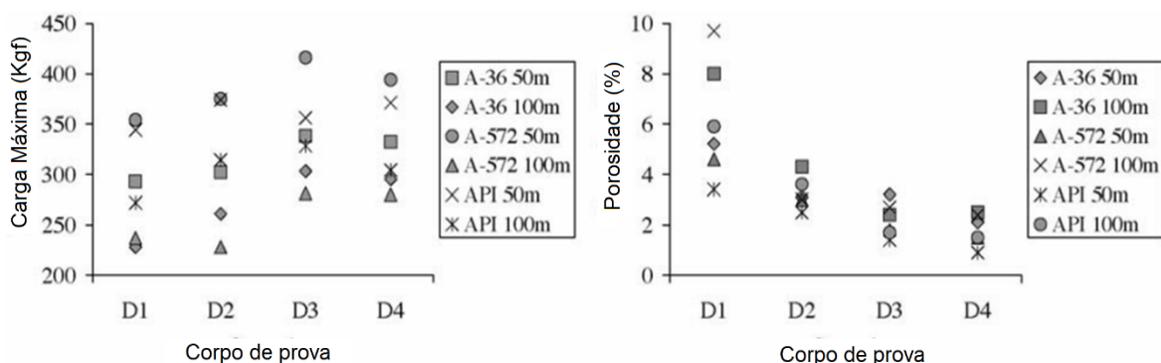
Figura 8 – Efeito da pressão hidrostática na porosidade do metal de solda



Fonte: (SUGA e HASUI, 1986)

A porosidade afeta negativamente as propriedades mecânicas das juntas soldadas, causando a redução da ductilidade, tenacidade, limite máximo de escoamento, etc. (LIU et al., 1994). Nesse sentido, PESSOA et al. (2006) estudaram a variação da porosidade ao longo de soldas multipasse, e sua relação com as propriedades mecânicas. Para este fim, empregaram 3 diferentes tipos de metal base, sendo usinados chanfros de 45°, com 6 mm de abertura de raiz. Posteriormente, executaram aproximadamente 10 passes no mesmo sentido de soldagem, utilizando os eletrodos comerciais E6013 e E7024 simulando as profundidades de 50 e 100 m em uma câmara hiperbárica, y com o auxílio de um sistema de soldagem por arrastre. Como resultado, obtiveram correlação negativa entre a porosidade e as propriedades mecânicas; tal como é mostrado na Figura 9. Nesse sentido, SANCHEZ-OSIO et al. (1995) propõem a adição de carbonato de cálcio no revestimento. A decomposição do carbonato de cálcio gera gases que reduzem a pressão parcial do hidrogênio no plasma. Isto diminui o crescimento de poros.

Figura 9 - Resultados do ensaio de dobramento e quantificação da porosidade dos corpos de prova obtidos com o eletrodo E6013 a 50 e 100 m de profundidade.



Fonte: (PESSOA et al., 2006)

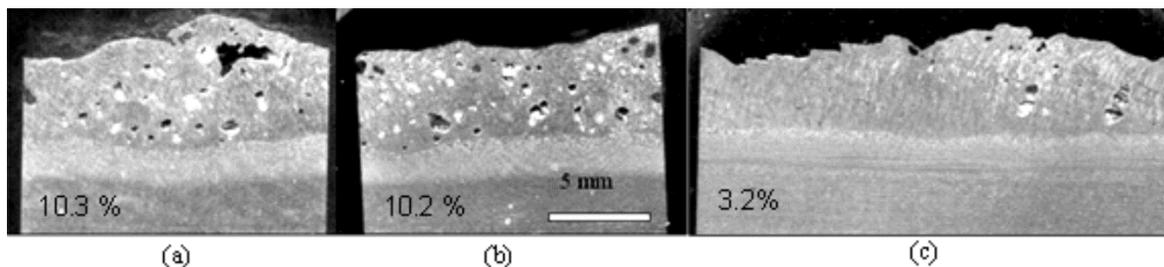
2.3 Corrente pulsada e sua aplicação na soldagem molhada

Em relação à corrente pulsada, esta tecnologia é amplamente utilizada nos processos GMAW (XU, et al., 2022) e GTAW (CUNHA, 2013). O objetivo do uso da corrente pulsada é controlar o destacamento da gota projetada a través do arco, influenciando na estabilidade do processo, entrada de calor, entre outros (DUTRA et al., 2012). Por outro lado, a aplicação da corrente pulsada e de fontes com características especiais na soldagem molhada tem sido pouco explorada. PESSOA e LIU (2021a, 2021b) mostram que o principal foco de estudo dos pesquisadores na área tem sido a otimização de formulações de consumíveis que agem na química do arco e a poça de fusão, o controle do teor de hidrogênio difusível e a mitigação do nível de porosidade; com a finalidade de melhorar as propriedades mecânicas e metalúrgicas do metal de solda.

Referente à aplicação da corrente pulsada no processo SMAW, SUGA e HASUI (1988) empregaram uma fonte de soldagem de pulso, controlada por um inversor de baixa frequência com o intuito de validar o efeito de quatro tipos de onda quadrada na soldagem de eletrodos revestidos de 4 mm de diâmetro nominal, na profundidade de 0,1 m e na polaridade DCEN. Os autores estudaram os oscilogramas de tensão do arco e corrente, caracterizaram a morfologia do cordão de solda, mediram o teor de hidrogênio difusível e

avaliaram as propriedades mecânicas, tais como resistência à tração, impacto, ductilidade de flexão e microdureza. Os autores concluíram que as soldas obtidas com corrente pulsada tem resistência a tração e ductilidade a flexão tanto quanto as soldas obtidas com corrente constante. PEREZ-GUERRERO e LIU (2007) estudaram a aplicação de corrente pulsada em eletrodos comerciais celulósicos E6010 em 75 m de profundidade. Os autores demonstraram que a porosidade no metal de solda pode diminuir de 10,2% com corrente constante até 3,2% com a aplicação de corrente pulsada (Ver Figura 10). Os autores relacionaram a diminuição da porosidade com a redução de eventos de curto circuito obtidos com a corrente pulsada. Recentemente, BERNARDI (2018) demonstrou que a taxa de fusão dos eletrodos revestidos é maior na corrente pulsada em comparação com a corrente constante. O autor explica que este fenômeno se deve a corrente eficaz ser maior, além de estar possivelmente influenciado pela transferência metálica.

Figura 10 - Seções longitudinais de cordões sobre chapa em 75 m de profundidade. (a) e (b) com corrente constante. (c) com corrente pulsada.

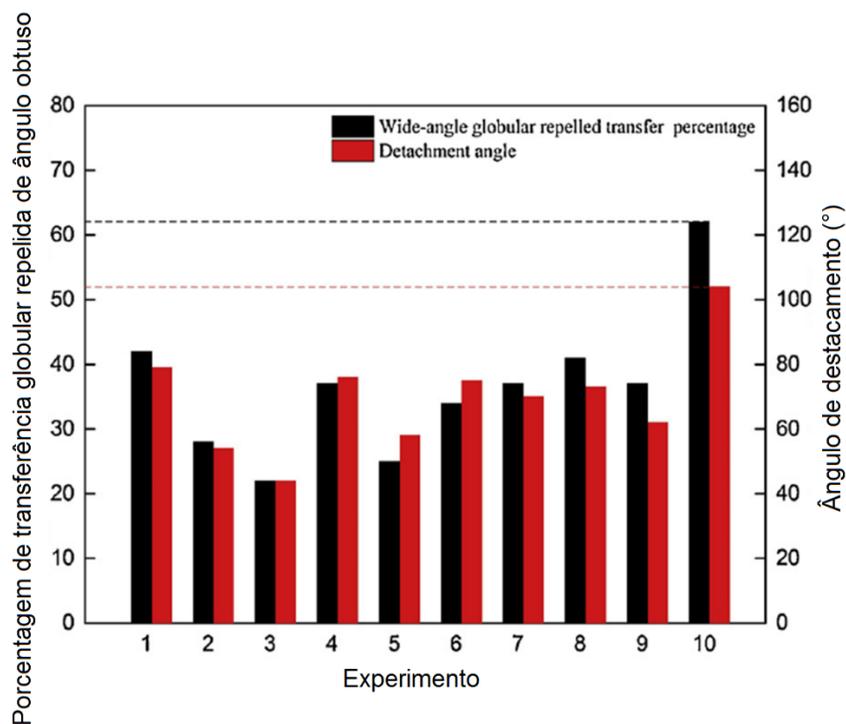


Fonte: (PEREZ-GUERRERO e LIU, 2007)

Como é discutido por CASTELLANOS-GONZALEZ et al. (2022b), recentemente se evidencia o estudo da corrente pulsada aplicada no processo FCAW. GUO et al. (2019), realizaram deposições com um arame tubular com sistema de escória $TiO_2-CaF_2-CaO-SiO_2$, com diâmetro igual a 1,6 mm, o qual operou com uma velocidade de soldagem (1,5 mm/s) e velocidade de alimentação (55 mm/s). Neste trabalho foi analisado o efeito que tiveram a frequência de pulso (f), o balanço da onda (D) e a corrente de pulso (I_p) no comportamento da transferência de metálica. Inicialmente, os autores identificaram que a transferência globular repelida de ângulo obtuso provocaria o detrimento da estabilidade do processo, já que aumenta a probabilidade de gerar maiores respingos e um formato de solda com menor

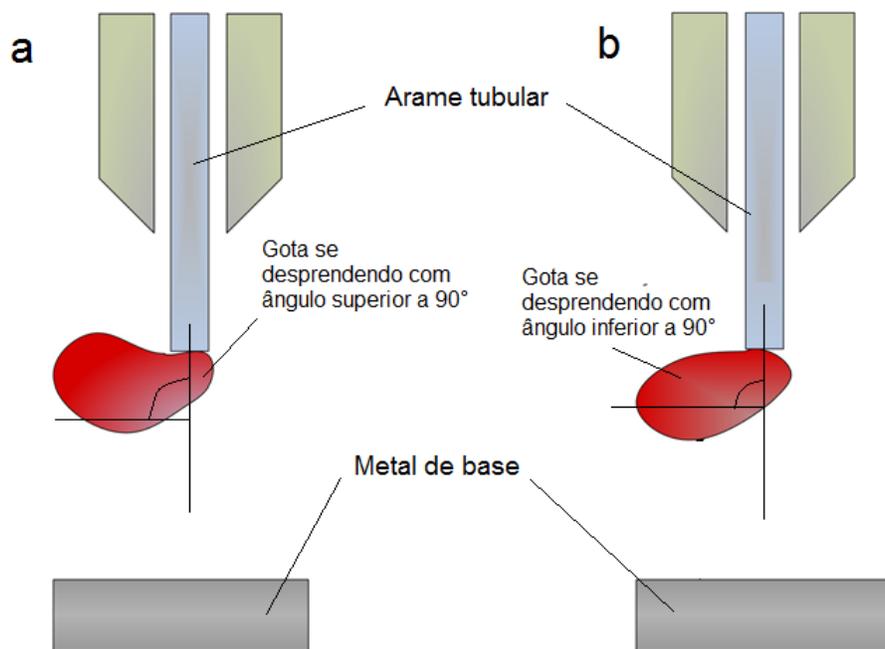
qualidade. Na Figura 11 pode-se ver que o experimento 10 (Processo convencional com corrente constante) obteve a maior porcentagem de transferência globular repelida de ângulo obtuso. Em contraste, os demais experimentos (todos com corrente pulsada) demonstraram uma estabilidade superior, destacando-se o experimento 3 (20 Hz de frequência de pulso, balanço da onda de 0,25 e corrente de pulso de 350 A). Segundo os autores, a corrente pulsada permite diminuir o efeito da força de repulsão e, por conseguinte o ângulo de destacamento (Ver Figura 12). Já, nos trabalhos de JIA et al. (2020) e WU et al. (2020) priorizou-se aumentar a frequência de destacamento diminuindo o tamanho das gotas e a otimização do formato de onda para obter uma gota por pulso, respectivamente. O objetivo desses trabalhos foi demonstrar características operacionais superiores em quanto a estabilidade do arco em função da aplicação da corrente pulsada.

Figura 11 - Caracterização da transferência globular repelida de ângulo obtuso na soldagem molhada com arame tubular.



Fonte: Guo et al. (2019)

Figura 12 - Transferência globular repelida na soldagem molhada com arame tubular. (a) ângulo obtuso (b) ângulo agudo.



Fonte: Adaptado de Guo et al. (2019)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Eletrodo revestido e metal de base

Para todas as condições experimentais foi utilizado um eletrodo oxi-rutilico de 3,25 mm de diâmetro nominal e 350 mm de comprimento. Este eletrodo é resultado de uma pesquisa entre a UFMG, PUC-Rio, ESAB e Petrobras. No trabalho de SANTOS et al. (2012) é avaliado o desenvolvimento deste consumível. Tal como pode ser visto na Tabela 2, os dois componentes principais do revestimento são a hematita e a rutila, sendo adicionados também outros elementos que ajudam na escorificação, geração de gás e aumento de propriedades mecânicas. Adicionalmente, foram aplicadas duas camadas de verniz vinílico Tubolit VVE 815, com o objetivo de evitar a degradação do revestimento em contato com a água. O metal de base utilizado, foram chapas de um aço AH-36 de 150 mm x 200 mm x 19 mm. Na Tabela 3 mostra-se a sua composição química.

Tabela 2 - Composição química do eletrodo revestido (%P/P)

Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Escorificantes, geradores de gás, elementos de liga
35 - 45	25-35	Restante

Fonte: SANTOS et al. (2012)

Tabela 3 - Composição química do aço AH36 (%P/P)

C	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	P	S	Si	Fe
0,16	0,01	0,01	1,41	0,001	0,01	0,016	0,006	0,23	Restante

Fonte: MORENO-URIBE (2018)

3.2 Equipamentos

3.2.1 Fonte de soldagem e esquema de aquisição de dados

A fonte de soldagem utilizada foi a HipER 1 da IMC Soldagem (Ver Figura 13). Este equipamento está projetado para fornecer uma corrente máxima de 450 A e uma tensão em vazio de 80 V, podendo operar em faixas de potência nominal entre 5 e 7 kW. A fonte possui um sistema anticolagem que permite configurar pulsos de corrente em função de extinções do arco elétrico. No entanto, para motivos deste estudo, este sistema foi desativado. Além disso, foi configurada uma corrente de abertura de 450 A, para facilitar a ignição do arco.

Figura 13 – Fonte de soldagem submarina HipER-1

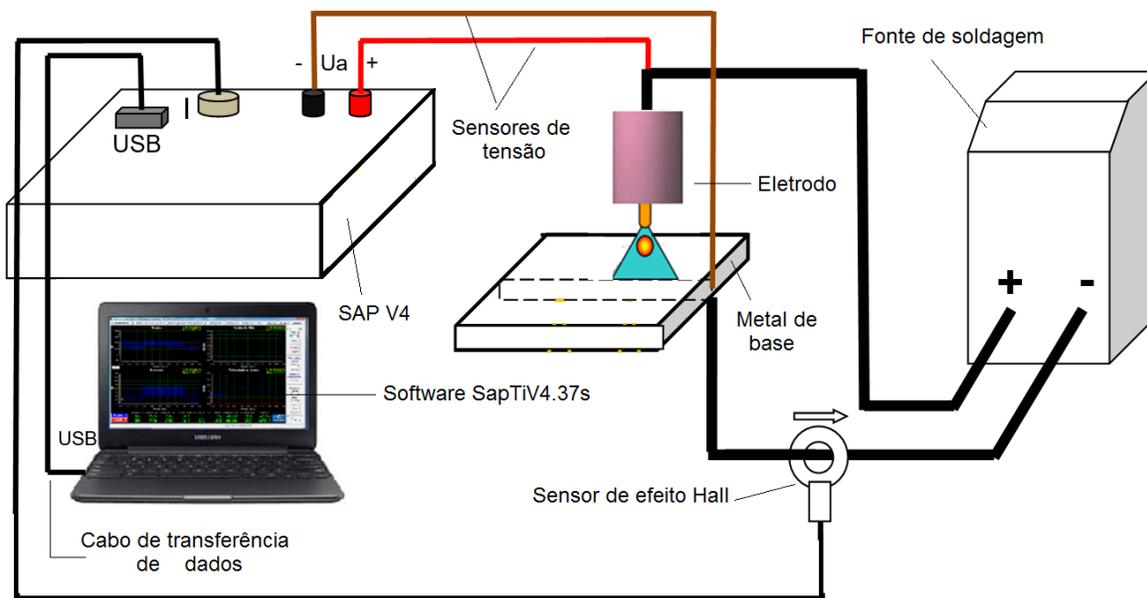


Fonte: (MORENO-URIBE, 2018)

Para a aquisição de dados, foi seguido o esquema indicado pelo fabricante, o qual é apresentado na Figura 14. A tensão do arco elétrico foi mensurada pela diferença de potencial entre o porta-eletrodo e o metal base. A leitura da corrente de soldagem foi realizada através de um sensor de efeito Hall. Esses sinais elétricos foram monitorados sincronicamente com o processo de soldagem, mediante o DAQ SAP V4 desenvolvido pela IMC Soldagem, em uma taxa de 5000 pontos por segundo; e armazenados no software SapTiV4.37s.

Adicionalmente, como recomendação do fabricante, foi utilizado um cabo de transferência de dados com filtros de ferrite, com o intuito de reduzir ruídos e perda de pontos coletados.

Figura 14 – Esquema representativo utilizado na aquisição de dados



Fonte: IMC Soldagem

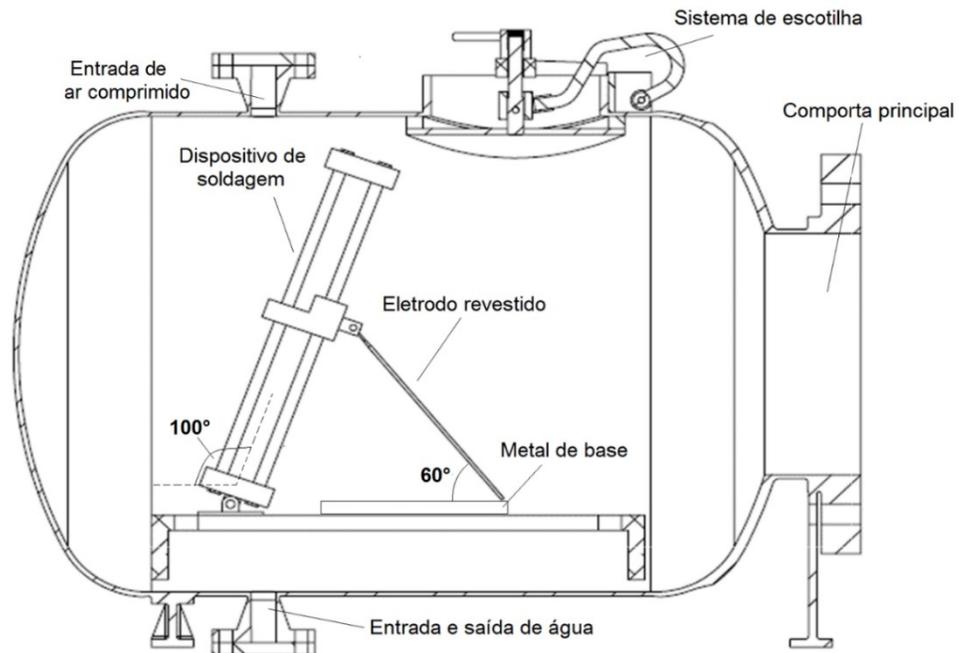
3.2.2 Câmera hiperbárica e sistema de soldagem

Os testes de soldagem foram executados dentro de uma câmara hiperbárica localizada no LRSS da UFMG (Ver Figura 15). Este equipamento permite simular condições de soldagem molhada até 50 m de profundidade. Recentemente, foi instalado um sistema de escotilha desenvolvido por LARA et al. (2020) o qual facilita a execução dos testes de soldagem em alta profundidade.

Para a produção das soldas, foi posicionado um sistema de soldagem dentro da câmara hiperbárica. Este equipamento auxilia na soldabilidade de consumíveis de 2,5 a 6,0 mm de diâmetro, com comprimento máximo de 450 mm, obtendo-se ótima repetibilidade (Ver Figura 16). Assim, o dispositivo permite o deslocamento do eletrodo revestido através de um eixo determinado pela configuração dos ângulos de ataque (α) e da componente gravitacional que atua na garra de fixação do eletrodo (β). Para este trabalho, a configuração dos ângulos

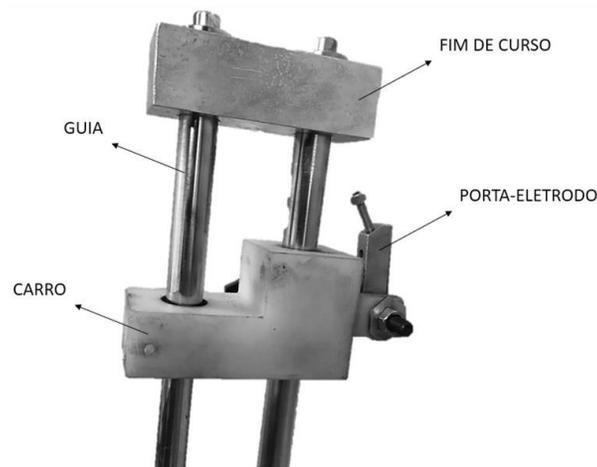
do dispositivo de soldagem por gravidade foi adotada do estudo realizado por MORENO-URIBE et al. (2017), sendo $\alpha = 60^\circ$ e $\beta = 100^\circ$.

Figura 15 – Esquema representativo da câmara hiperbárica



Fonte: Autor

Figura 16 - Detalhe do sistema de soldagem por gravidade



Fonte: (MORENO-URIBE, 2018)

3.3 Desenho experimental

A Tabela 4 mostra os quatro fatores de dois níveis utilizados no desenho experimental, compreendendo: amplitude de corrente (A), frequência de pulso (Hz), polaridade e profundidade (m). O processo de seleção das variáveis foi executado da seguinte maneira:

- i). Em relação a amplitude de corrente, foi seguida a metodologia estabelecida por CUNHA et al. (2016). Foi fixada uma $I_m = 150$ A. Seguidamente, o valor da corrente de pulso foi aumentando enquanto o valor da corrente de base foi reduzido na mesma proporção. Para o nível inferior, uma amplitude de 40 A ($I_p = 170$ A – $I_b = 130$ A). Já para o nível superior, uma amplitude de 100 A ($I_p = 200$ A – $I_b = 100$ A).
- ii). Os níveis de frequência de pulso, 10 e 125 Hz, foram selecionados já que SUGA e HASUI (1988) trabalharam apenas até 8 Hz. A finalidade deste trabalho, é estudar o comportamento operacional em outras faixas de frequência de pulso. Além disso, a onda foi configurada para manter um balanço de 50%.
- iii). Os níveis de profundidade escolhidos foram 0,4 m (inferior) e 30 m (superior). SUGA e HASUI (1988) executaram as soldas em 0,1 m de profundidade. Por conseguinte, é interessante analisar a dinâmica do pulso em maiores profundidades.
- iv). Foram utilizadas as duas configurações de polaridade da corrente: eletrodo positivo (+1) y eletrodo negativo (-1).

Com o objetivo de estimar o erro experimental e avaliar de forma mais precisa o efeito de cada fator sobre as respostas do experimento, foram realizadas 3 réplicas.

Tabela 4 - Fatores principais e níveis do experimento

Fator	Níveis	
	Inferior	Superior
Amplitude de Corrente (A)	40	100
Frequência de pulso (Hz)	10	125
Polaridade	-1	+1
Profundidade (m)	0.4	30

Fonte: Autor

3.4 Procedimento para a realização das soldas

Para a produção das soldas foi criada uma bancada experimental (Ver Figura 17). O processo de soldagem foi executado da seguinte maneira:

1. A seção metálica da alma do eletrodo revestido é posicionada no porta eletrodo de cobre do sistema de soldagem por gravidade. Posteriormente, é alinhado o metal de base.
2. É fechada a comporta principal da câmara hiperbárica. Adicionalmente, é bombeada água doce para dentro até uma altura de coluna de água de 0,4 m; sendo simulada a profundidade de lâmina de água. No caso da alta profundidade (30 m), é fechado o sistema de escotilha, permitindo a vedação e pressurização da câmara, utilizando ar comprimido.
3. Após a pressurização, o contato elétrico é estabelecido e a solda é iniciada. Sincronamente são medidos os sinais de corrente e tensão do arco, seguindo o esquema supracitado. Conseqüentemente da extinção do arco, o ar é liberado (em caso da simulação da alta profundidade) e a água é bombeada para fora da câmara.
4. Finalmente, a comporta principal é aberta e um novo eletrodo revestido é posicionado, sendo conduzido outros experimentos seguindo novamente a metodologia demarcada em 2 e 3.

Figura 17 - Bancada experimental para a produção de soldas molhadas



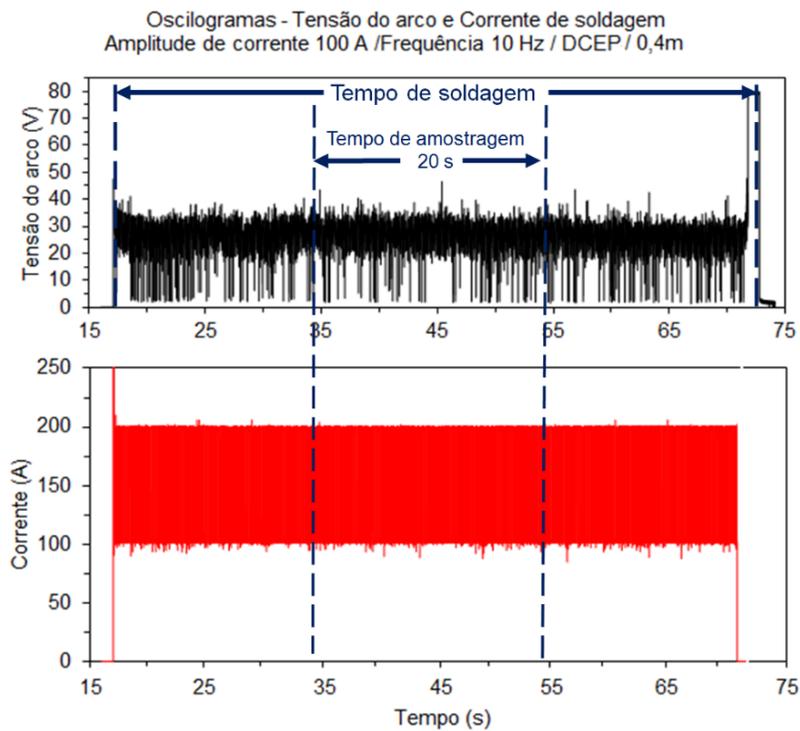
Fonte: Autor

3.5 Dados experimentais

3.5.1 Comportamento elétrico

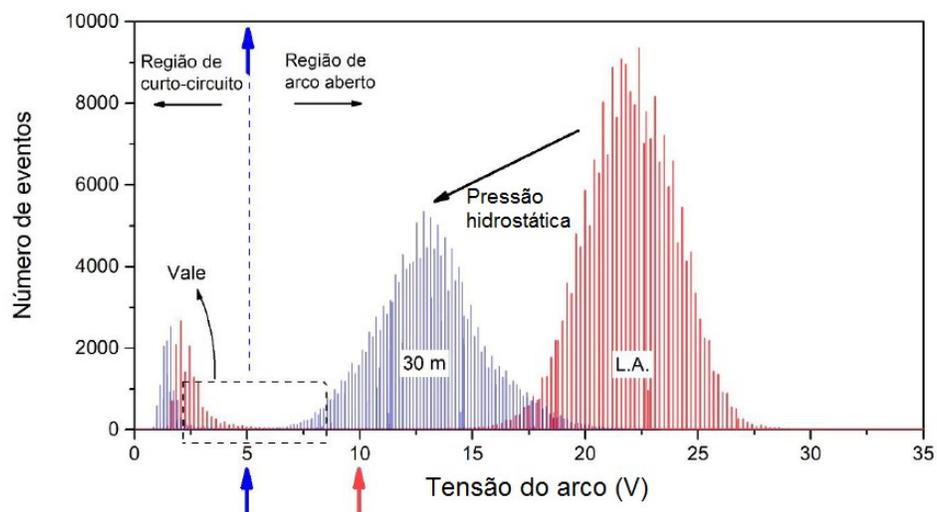
Foram tratados os dados obtidos mediante o uso do software SINAL, o qual foi desenvolvido pelo Professor PhD. Paulo Jose Modenesi. Os dados elétricos foram obtidos do tempo de amostragem. O tempo de amostragem foi escolhido da metade dos oscilogramas de tensão do arco e corrente de soldagem com a finalidade de analisar os dados de todas as combinações de parâmetros no mesmo instante, similar ao executado por RIBEIRO-MENEZES et al. (2019). Todavia, foram selecionados 20 s a fim de analisar uma maior quantidade de eventos (Ver Figura 18). A taxa de fusão foi calculada como a razão entre o comprimento consumido do eletrodo e o tempo de soldagem (RIBEIRO-MENEZES et al., 2019). O I_{CC} resulta da razão entre os números de curtos circuitos e o tempo de amostragem (20 s). MAZZAFERRO e MACHADO (2008) utilizaram o valor de 5 V na tensão do arco como referência para contabilizar os curtos circuitos. No entanto, MORENO-URIBE et al. (2020) comentam que a profundidade e a polaridade influenciam o comportamento operacional, o que também modifica a distribuição dos eventos referentes a tensão do arco. Nesse sentido, MORENO-URIBE et al. (2023) propõem o uso de um valor de corte dinâmico. Por exemplo, MORENO-URIBE (2020) mostra dois valores de corte para DCEN, os quais dependem da profundidade de operação (Ver Figura 19). A seta azul indica a tensão de arco de referência utilizada para 30 m (5 V) e a seta vermelha indica o valor de corte na tensão do arco para lâmina de água (10 V). Além disso, foram considerados exclusivamente eventos de curto circuito com duração ≥ 2 ms, como recomendado por SCOTTI et al. (1999).

Figura 18 - Tempo de soldagem e amostragem dos oscilogramas de tensão e corrente



Fonte: Autor.

Figura 19 – Valor de corte dinâmico utilizado nos experimentos de MORENO-URIBE (2020) para DCEN dependendo da profundidade.



Fonte: Adaptado de MORENO-URIBE (2020)

3.5.2 Morfologia do cordão

Cortes transversais de 15 mm do centro do cordão foram realizados para avaliar as características da seção transversal. Com o objetivo de diferenciar a ZF da ZTA, foram utilizadas técnicas metalográficas convencionais (lixamento com lixas de grão 80, 150, 200, 400 e 600; e ataque químico com Nital 2%). O software Image J permitiu o processamento de imagem.

3.6 Análise de regressão

O método estatístico utilizado foi análise de regressão, a qual permitiu a obtenção de modelos explicativos. Na equação 1 nota-se que y_n representa a variável resposta o dependente. Em quanto que A , B , e C são as regressoras ou variáveis independentes que definem a resposta (as quais também podem ser expressadas como interações de primeira, segunda ou enésima ordem). Como pode ser visto, a equação mostra uma relação linear entre as variáveis. Por conseguinte, se define que uma regressão linear múltipla é uma técnica que permite investigar e modelar a relação entre variáveis. Nesse sentido, as variáveis dependentes ou resposta são aquelas que os investigadores intentam explicar ou prever mediante uma RLM (MONTGOMERY et al., 2012). Os coeficientes (β_a, β_b e β_c) podem ser estimados utilizando diferentes métodos, sendo a estimação de mínimos quadrados o mais usado.

$$y_n = \alpha + \beta_a * A + \beta_b * B + \beta_c * C + \dots + erro\ variável \quad (1)$$

Com a finalidade de obter modelos explicativos ou preditivos confiáveis, diferentes autores explicam que devem ser cumpridas hipóteses ou pressupostos em uma RLM. ZONATO et al. (2018) comentam que uma análise clássica de regressão linear deve cumprir com 3 pressupostos importantes:

- Linearidade do modelo. Este pressuposto assume que a relação entre as variáveis independentes (X) e a variável dependente (Y) é linear. Isso significa que as

mudanças em Y são proporcionais às mudanças nas variáveis independentes, e a relação pode ser representada por uma linha reta.

- A distribuição dos erros deve cumprir com a normalidade. O pressuposto de normalidade dos resíduos assume que, para cada valor de X (conjunto específico de valores das variáveis independentes), os resíduos se distribuem de acordo com uma distribuição normal.
- Homocedasticidade ou homogeneidade da variância. Este pressuposto supõe que a variabilidade dos resíduos (diferenças entre os valores observados e os valores previstos) é constante para todos os níveis das variáveis independentes. Em outras palavras, não deve haver um padrão sistemático na dispersão dos resíduos em relação aos valores previstos.

Para o presente trabalho, o software utilizado foi MINITAB, que auxiliou na execução das análises de regressão, mediante o método de mínimos quadrados. Na Figura 20 é apresentado o fluxograma da metodologia estatística, o qual é explicado a seguir:

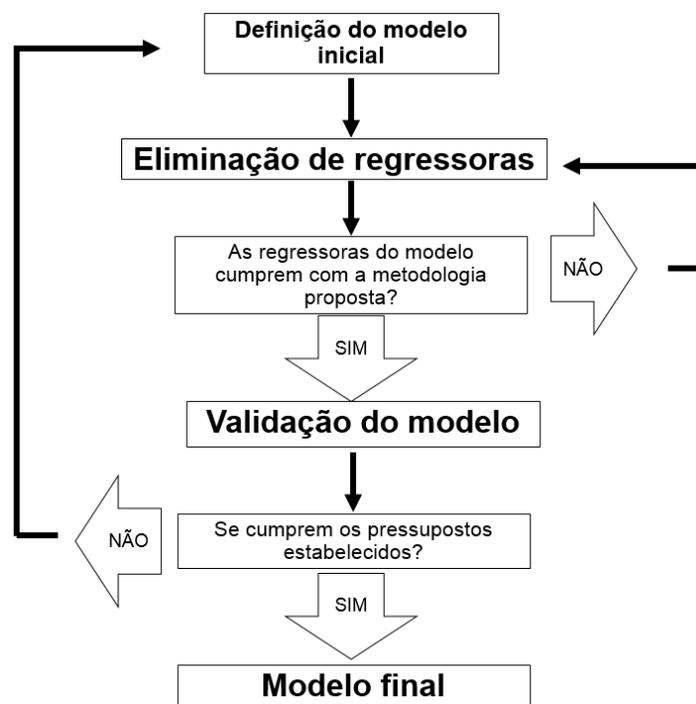
i). Seleção de variáveis. Nesta etapa, se definiram as equações iniciais de regressão. Para este estudo, as respostas a serem analisadas permitiram avaliar o comportamento elétrico e a morfologia do cordão de solda, tais como taxa de fusão, tensão do arco, desvio padrão da tensão, penetração máxima, largura e área de penetração. Como regressoras do modelo, foram utilizados os quatro fatores e as suas interações de primeira ordem. Além disso, também foram consideradas as respostas como regressoras, a fim de analisar a sua influência no modelo.

ii). Eliminação de variáveis. Similar ao efetuado por ASSUNÇÃO e BRACARENSE (2017), foi executada a análise de regressão e posteriormente removidas as variáveis e interações que não apresentaram significância mediante ANOVA. Além disso, se eliminaram variáveis que não impactaram de maneira significativa na resposta, com a finalidade de obter um modelo mais simples (MONTGOMERY et al., 2012).

Também, foram eliminadas as variáveis do modelo com base na análise de multicolinearidade, com a finalidade de remover regressores redundantes. Tal como sugere o diagrama de fluxo, esta etapa foi executada até que os regressores do modelo cumprissem com a metodologia proposta nesta etapa.

iii). Validação do modelo. Foi validado o modelo obtido mediante os pressupostos estabelecidos. Para isto, seguiu-se a metodologia explicada por ZONATO et al. (2018). Uma vez cumpridos, foi obtido o modelo final. A metodologia para a obtenção dos modelos finais é mostrada no apêndice deste trabalho. Adicionalmente, a discussão dos resultados será auxiliada pelos gráficos de interação que resultaram da análise de regressão executada. Esses gráficos de interação mostram médias ajustadas, ou seja, com um 95% de confiança pode-se afirmar que esses valores são significativos.

Figura 20 - Fluxograma utilizado na obtenção dos modelos explicativos



Fonte: Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Dados coletados

Na Tabela 5 são apresentados os valores obtidos das variáveis resposta para todas as condições experimentais.

Tabela 5 - Dados coletados do comportamento elétrico e caracterização da morfologia do cordão de solda*

Condição	Tf (mm/s)	U (V)	DPU (V)	KvU (%)	I _{cc}	P (mm)	L (mm)	AP (mm ²)
40-10-LA-EN-1	4,4	23,9	3,6	15,1	2,2	1,8	9,5	9,9
100-10-LA-EN-2	5,0	25,3	6,2	24,5	5,8	2,0	10,2	11,0
40-125-LA-EN-3	4,2	26,4	2,7	10,2	0,5	2,4	9,0	12,4
100-125-LA-EN-4	4,3	25,5	3,6	14,1	1,5	1,6	11,4	9,5
40-10-LA-EP-5	4,1	24,2	3,3	13,6	1,4	1,7	11,3	12,1
100-10-LA-EP-6	4,5	28,3	4,3	15,2	1,1	3,2	10,0	17,7
40-125-LA-EP-7	3,9	26,3	2,3	8,7	0,5	2,6	10,5	16,6
100-125-LA-EP-8	4,1	25,5	2,5	9,8	0,4	2,3	10,9	16,1
40-10-30-EN-9	3,1	20,5	3,5	17,1	1,7	2,1	10,7	12,7
100-10-30-EN-10	3,2	17,9	5,4	30,2	6,5	2,5	8,7	12,0
40-125-30-EN-11	2,9	18,3	4,4	24,0	4,1	2,2	8,1	9,1
100-125-30-EN-12	3,1	18,7	4,7	25,1	6,4	1,7	9,6	10,1
40-10-30-EP-13	4,5	24,0	3,9	16,3	4,4	1,2	11,1	8,6
100-10-30-EP-14	4,6	24,9	5,8	23,3	4,9	1,5	10,0	8,0
40-125-30-EP-15	4,4	24,6	3,7	15,0	2,2	1,3	12,6	8,4
100-125-30-EP-16	4,5	23,6	4,2	17,8	3,9	1,1	12,2	7,6
40-10-LA-EN-17	4,4	24,6	3,4	13,8	2,1	1,8	10,3	11,7
100-10-LA-EN-18	5,1	24,9	6,6	26,5	6,1	1,6	9,6	9,2
40-125-LA-EN-19	4,3	25,9	2,6	10,0	0,6	2,3	9,8	12,3
100-125-LA-EN-20	4,3	24,4	3,6	14,8	1,5	1,4	10,7	8,5
40-10-LA-EP-21	4,1	25,5	2,9	11,4	1,4	2,0	11,2	12,7
100-10-LA-EP-22	4,6	27,2	4,4	16,2	1,9	3,1	9,9	17,9
40-125-LA-EP-23	4,0	27,3	2,2	8,1	0,4	2,1	10,7	14,9
100-125-LA-EP-24	4,1	25,5	2,4	9,4	0,6	2,5	11,3	16,8
40-10-30-EN-25	3,0	19,6	4,1	20,9	2,8	1,8	10,8	12,7
100-10-30-EN-26	3,2	18,1	5,3	29,3	5,8	2,6	8,9	12,0
40-125-30-EN-27	2,9	19,6	4,0	20,4	2,6	2,1	8,4	10,1

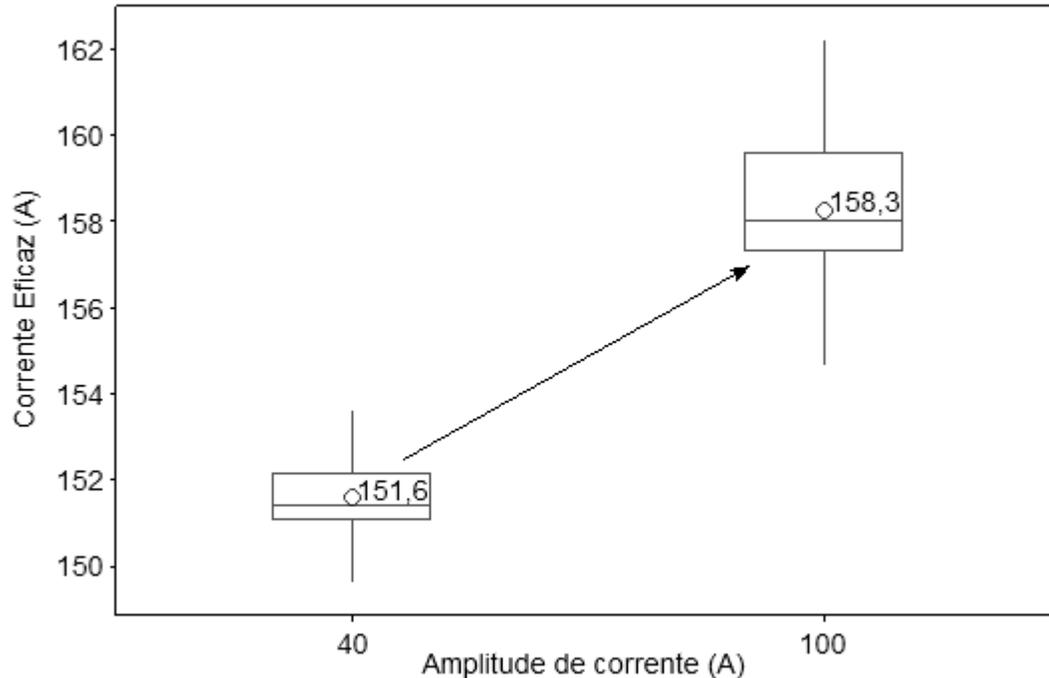
100-125-30-EN-28	3,1	18,5	4,5	24,3	7,2	1,8	8,8	9,9
40-10-30-EP-29	4,1	23,4	3,9	16,7	3,7	1,3	11,0	7,8
100-10-30-EP-30	4,7	23,8	5,2	21,8	5,7	1,4	11,6	9,7
40-125-30-EP-31	4,4	23,9	3,7	15,5	3,4	1,1	11,5	6,6
100-125-30-EP-32	4,5	23,8	4,1	17,2	3,4	1,1	12,9	7,7
40-10-LA-EN-33	4,5	24,5	4,0	16,3	2,5	1,2	9,9	7,3
100-10-LA-EN-34	5,0	24,8	6,1	24,6	4,9	2,1	9,9	13,4
40-125-LA-EN-35	4,3	25,5	2,7	10,6	1,0	2,7	9,0	15,8
100-125-LA-EN-36	4,3	24,3	3,5	14,4	2,2	1,6	10,8	10,6
40-10-LA-EP-37	4,1	24,9	3,1	12,4	1,3	2,1	11,3	13,4
100-10-LA-EP-38	4,6	27,2	4,2	15,4	1,5	3,1	10,2	17,2
40-125-LA-EP-39	4,0	25,2	2,2	8,7	0,5	2,2	10,7	15,2
100-125-LA-EP-40	4,1	25,1	2,5	10,0	0,9	2,3	11,3	15,1
40-10-30-EN-41	3,0	20,1	3,9	19,4	2,1	2,2	10,6	14,1
100-10-30-EN-42	3,2	17,8	5,2	29,2	5,9	2,5	8,5	12,1
40-125-30-EN-43	2,8	19,6	3,9	19,9	2,5	1,8	10,3	11,1
100-125-30-EN-44	3,1	19,0	4,7	24,7	5,8	2,1	8,7	10,0
40-10-30-EP-45	4,5	23,3	3,8	16,3	3,5	1,2	12,2	8,1
100-10-30-EP-46	4,7	24,1	5,3	22,0	5,8	1,4	12,3	9,3
40-125-30-EP-47	4,4	23,5	3,6	15,3	3,0	1,2	9,9	6,7
100-125-30-EP-48	4,5	23,9	4,4	18,4	3,5	1,1	14,2	8,1

*Tf= taxa de fusão, U = tensão do arco, DPU = Desvio padrão da tensão do arco, KvU = Coeficiente de variação da tensão do arco, I_{cc} = Índice de curto circuito, P = Penetração máxima na seção transversal do metal de solda, L = Largura na seção transversal do metal de solda, AP = Área de penetração na seção transversal do metal de solda

4.2 Definição do comportamento elétrico

No gráfico da Figura 21 os valores da corrente eficaz para as duas amplitudes de corrente utilizadas são apresentados. Observa-se que o valor médio da corrente eficaz aumenta de 151,6 A para 158,3 A no nível superior de amplitude de corrente. Como é esperado, existe uma correlação positiva entre a corrente eficaz e a amplitude de corrente, para a mesma corrente média (CORREIA e SCOTTI, 2017).

Figura 21- Boxplot dos valores de corrente eficaz medidos para cada amplitude de corrente



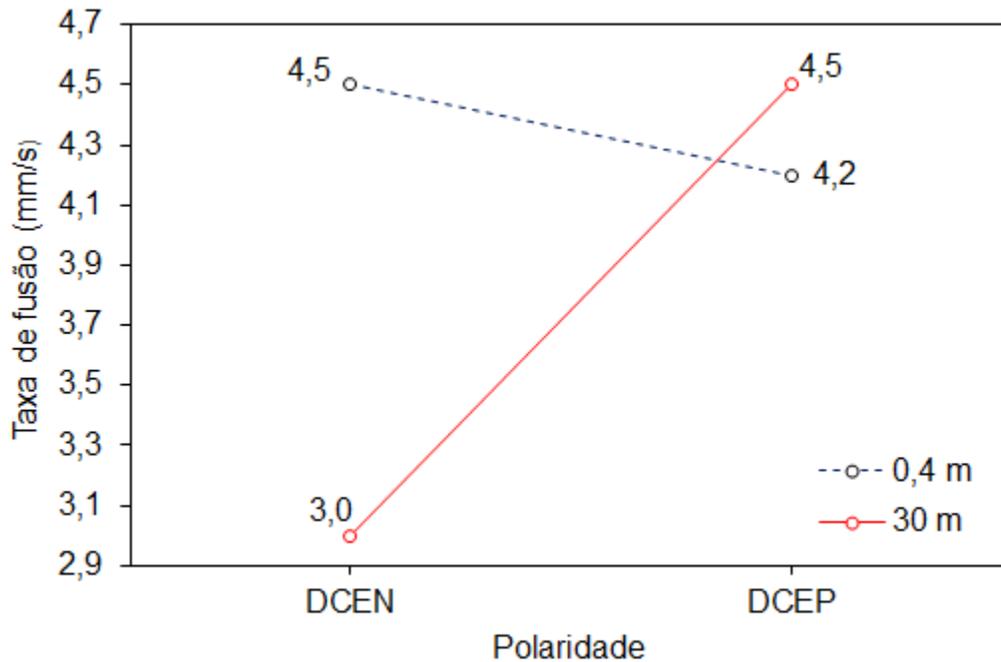
Fonte: Autor

O gráfico de interação da Figura 22 ilustra que na profundidade de lâmina de água o valor médio da taxa de fusão é maior quando o consumível está ligado no polo negativo. Este comportamento é similar ao balanço térmico discutido por SOUZA et al. (2009) para o processo GMAW executado ao ar, onde aproximadamente 70% do calor do arco é concentrado na ponta do eletrodo, resultando em uma velocidade de fusão superior em DCEN. De modo semelhante, KAH (2021) observou que em AC-GMAW, o fluxo de elétrons funde o metal de adição com maior intensidade durante o estágio negativo do ciclo de onda, em contraste com a fase positiva.

Contudo, em 30 m obteve-se maior taxa de fusão em DCEP. De acordo com MORENO-URIBE et al. (2017), comparando o comportamento nas duas polaridades e mantendo a corrente constante em 190 A, a taxa de fusão foi mais elevada em DCEP na soldagem atmosférica, em 5 e 10 m de profundidade. Já para DCEN, MORENO-URIBE et al. (2020) argumentam que a geração de energia do eletrodo quando ligado no cátodo vê-se afetada pela profundidade, provocando a redução da taxa de fusão. Experimentos onde a diminuição da velocidade de consumo do eletrodo revestido em DCEN na soldagem molhada

por causa da profundidade, também foram reportados por SUGA e HASUI (1990). Os autores registraram que até 0,6 Mpa de pressão, a taxa de fusão diminuiu na polaridade direta.

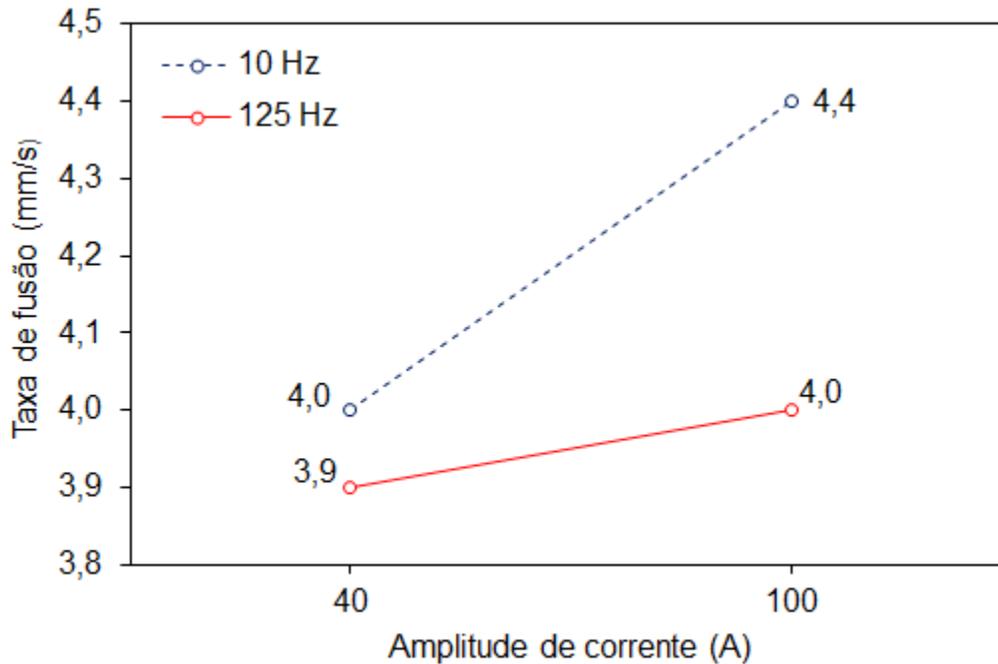
Figura 22 - Médias ajustadas obtidas para a taxa de fusão. Interação entre polaridade e profundidade.



Fonte: Autor

Na Figura 23 é possível notar que o valor médio da taxa de fusão é mais elevado na frequência de pulso de 10 Hz em comparação com 125 Hz, aumentando 3 e 10 % na amplitude de 40 A e 100 A, respectivamente. Conforme GONÇALVES et al. (2019), o perfil de temperatura medido na superfície da gota indica que um maior tempo de duração da corrente de pulso gera gotas mais quentes do que uma duração de corrente de pulso menor. Nesse sentido, isto poderia ser um indício de um maior aquecimento por efeito joule. Por conseguinte, a taxa de fusão aumentaria na menor frequência de pulso. Além disso, a taxa de fusão é maior no nível superior da amplitude de corrente, ou seja, obteve-se uma maior velocidade de fusão do eletrodo com o acréscimo da corrente eficaz.

Figura 23 - Médias ajustadas obtidas para a taxa de fusão. Interação entre amplitude de corrente e frequência de pulso.

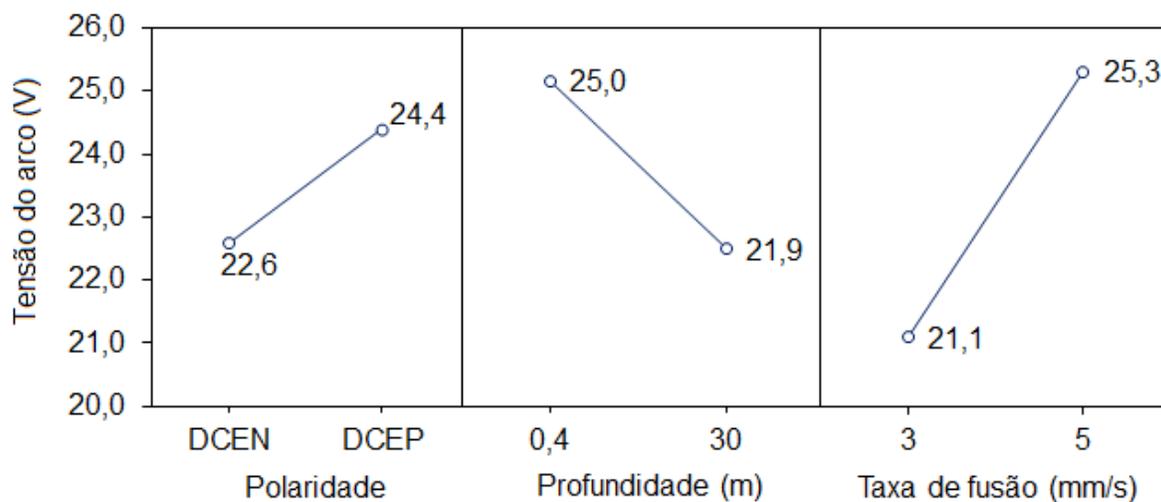


Fonte: Autor

Na Figura 24 apresentam-se as médias ajustadas da tensão do arco em função da polaridade, profundidade e taxa de fusão. Em primeiro lugar, a tensão do arco aumenta de 22,6 V para 24,4 V quando a polaridade muda de DCEN para DCEP. De acordo com o modelo proposto por TSAI e MASUBUCHI (1977), na polaridade DCEP tem-se um comprimento de arco mais longo, conseqüentemente, uma maior tensão do arco que em DCEN. Isto ocorre devido ao maior comprimento do cone na ponta do eletrodo. Por outro lado, a tensão do arco diminui com a profundidade, aproximadamente em 12,4 %. DE MELLO et al. (2018) em experimentos de soldagem molhada com eletrodos revestidos comerciais até uma profundidade de 50 m, descobriram que a tensão de soldagem diminui com o aumento da profundidade de 0,5 m até 10 m para eletrodos revestidos de aço carbono. Adicionalmente, foram registros menores valores de tensão do arco em comparação com aqueles encontrados em solda a ar. Finalmente, nota-se que o valor da tensão do arco elétrico aumenta em aproximadamente 20% com a taxa de fusão. De acordo aos experimentos executados por CASTELLANOS-GONZALEZ et al. (2022a), uma maior taxa de consumo

incrementa a fusão instantânea. Este comportamento afasta a ponta do eletrodo da poça de fusão, aumentando a tensão do arco.

Figura 24 - Médias ajustadas. Efeito da polaridade, profundidade e taxa de fusão na tensão do arco.



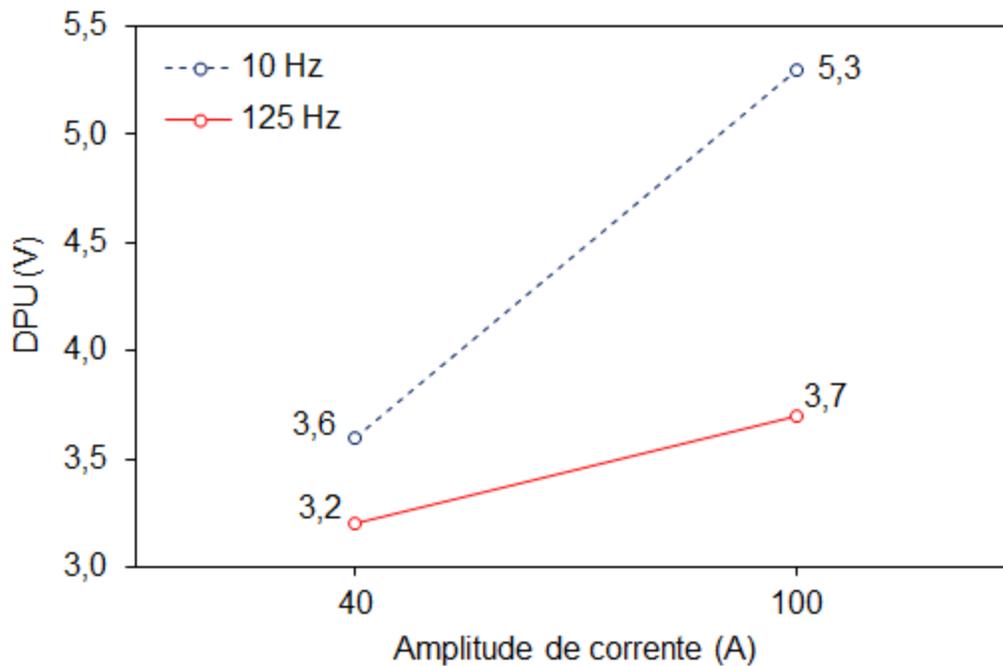
Fonte: Autor

Como foi mencionado, a estabilidade na soldagem molhada pode ser avaliada através do KvU. No entanto, a correlação de Pearson com um nível de confiança de 95%, permitiu demonstrar que existe uma forte relação linear entre KvU e o DPU ($r = 0,904$) (Ver Apêndice G). Além disso, também existe uma forte correlação entre DPU e I_{CC} ($r = 0,856$) (Ver Apêndice G). Segundo FIGUEREIDO e SILVA (2009), o coeficiente de correlação de Pearson demonstra a força e a direção da relação linear entre duas variáveis. Uma correlação muito alta (próxima de 1 ou -1) sugere uma relação linear forte entre elas. Nesse sentido, para termos deste trabalho, o desvio padrão da tensão será adotado para avaliar a estabilidade do processo, e a dinâmica dos curtos circuitos. Da mesma maneira, REIS et al. (2011) sugerem que o aumento do desvio padrão da tensão representa maior dificuldade para o acendimento e manutenção do arco, conseqüentemente aumentando a instabilidade.

A Figura 25 mostra uma correlação positiva entre o desvio padrão da tensão e a amplitude da corrente, i.e., no maior nível de amplitude de corrente se apresentaram os maiores valores médios de DPU. Em 10 e 125 Hz o valor médio do DPU aumentou 47,6 % e 17,7 %, respectivamente. DA SILVA et al. (2012) explicam que baixos valores médios de

tensão do arco aumentam a probabilidade da gota líquida tocar a poça de fusão conforme um comprimento de arco mais curto. Contudo, o valor médio de tensão do arco obtido com as duas amplitudes de corrente não foi estatisticamente significante, sendo 23,5 e 23,4 V para 40 e 100 A, respectivamente (Ver tabela 5). Não obstante, é conhecido que a soldabilidade de eletrodos revestidos de 3,25 mm de diâmetro, em correntes nominais menores que 120 A, pode se ver dificultada porque esses valores são insuficientes para uma fusão estável da ponta do eletrodo. Por conseguinte, na maior amplitude de corrente existe uma maior tendência de ocorrer curtos circuitos, devido a que esta configuração tem uma corrente de base equivalente a 100 A. Adicionalmente, a Figura 25 mostra que nos dois níveis de amplitude de corrente, o valor médio do DPU sempre é maior em 10 Hz, em comparação com 125 Hz. Por conseguinte, para compreender melhor a influência da aplicação de uma onda retangular na soldagem molhada, contou-se com o auxílio dos oscilogramas de tensão do arco e corrente.

Figura 25 - Médias ajustadas obtidas para DPU. Interação entre amplitude de corrente e frequência de pulso.

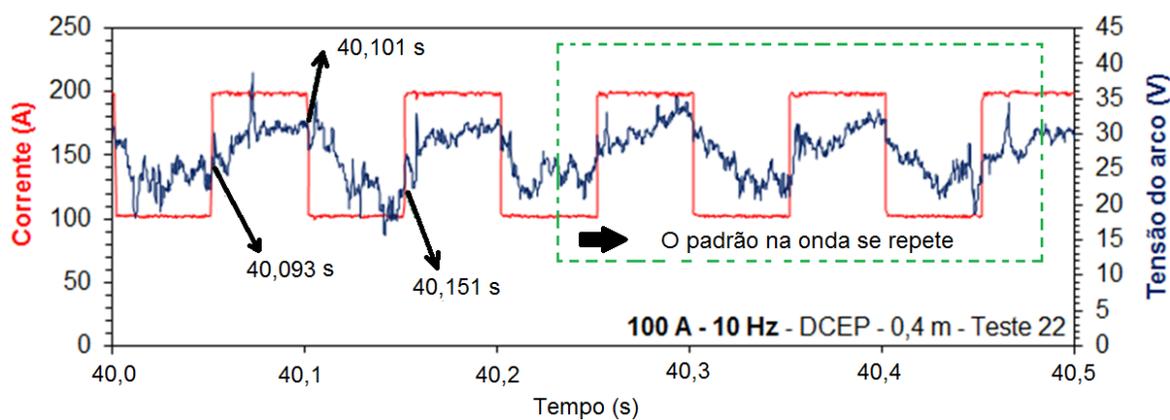


Fonte: Autor

Na Figura 26, observa-se que aos 40,503 segundos o valor da tensão do arco é 25,5 V, aumentando até 31,3 até o encerramento do período de duração da corrente de pulso aos 40,101 segundos. Posteriormente, a tensão do arco diminui gradualmente para 21,4 V até os

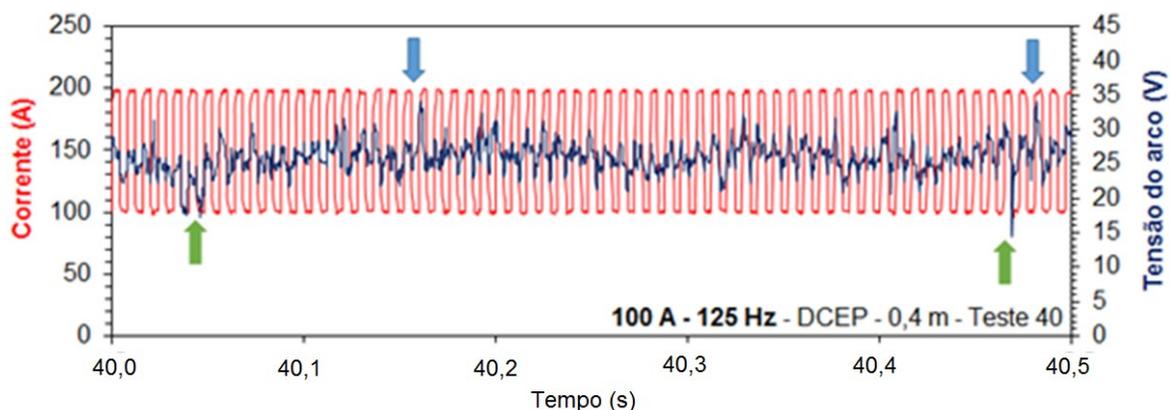
40,151 segundos. Esse padrão se repete posteriormente (Linha verde pontilhada). Em contrapartida, o aumento da frequência de pulso para 125 Hz (Figura 27) reduziu a duração dos picos e quedas de tensão, contribuindo a mitigar a brusca alteração da tensão do arco, em comparação com o apresentado no teste 22. Em outros termos, o aumento da frequência de pulso ajudou a atenuar as perturbações no sinal de tensão derivadas da instabilidade apresentada no ambiente molhado. Para frequências de pulso mais elevadas, i.e., quando o período de onda da corrente é reduzido, existe uma tendência a diminuição do DPU. Apesar de uma corrente de base equivalente a 100 A, uma imposição periódica de uma corrente de pulso possibilita que o valor da tensão não decresça nesses instantes de correntes baixas onde pode acontecer o desligamento do arco. Assim, a tensão do arco tende a ser equalizada para um valor de desvio determinado, diminuindo-o. Este comportamento é similar ao abordado por POPE et al. (1998). Os autores utilizaram uma fonte que aplicou pulsos de corrente que se anteciparam à ocorrência de curtos circuitos. O objetivo dessa técnica foi diminuir o desvio padrão da tensão do arco na soldagem molhada com eletrodo revestido.

Figura 26 - Esquema que mostra a dinâmica da tensão do arco em função da corrente de pulso



Fonte: Autor

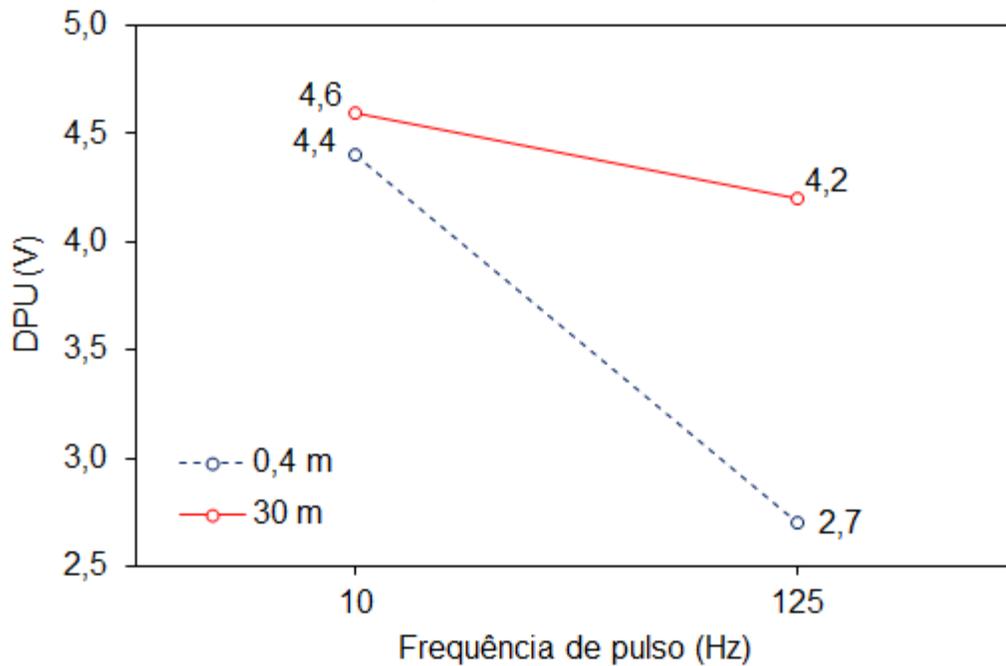
Figura 27 - Esquema que mostra o efeito do aumento da frequência de pulso nos picos (setas azuis) e quedas (setas verdes) da tensão do arco.



Fonte: Autor

Na Figura 28 pode se observar que o efeito do aumento da frequência de pulso no valor médio de DPU mostra um gradiente menos pronunciado em 30 m que na condição de lâmina de água. Especificamente, o aumento da frequência de pulso em 0,4 m diminui o valor médio do desvio padrão da tensão em 39%, no entanto, em 30 m diminui apenas 9%. Este comportamento tem relação com o documentado por CHEN et al. (2018). Os autores comprovaram que o coeficiente de variação da tensão do arco aumentou com a profundidade, desde 30 m até 90 m, acrescentando a instabilidade. Como os experimentos foram executados com uma fonte de tensão constante, esse aumento do coeficiente de variação deve-se a uma grande perturbação do ruído da tensão do arco (maior desvio padrão da tensão), o qual é induzido pelo aumento da pressão hidrostática. Segundo OMAJENE et al. (2014), a profundidade é um fator determinante na contração do arco elétrico e compromete a estabilidade do processo.

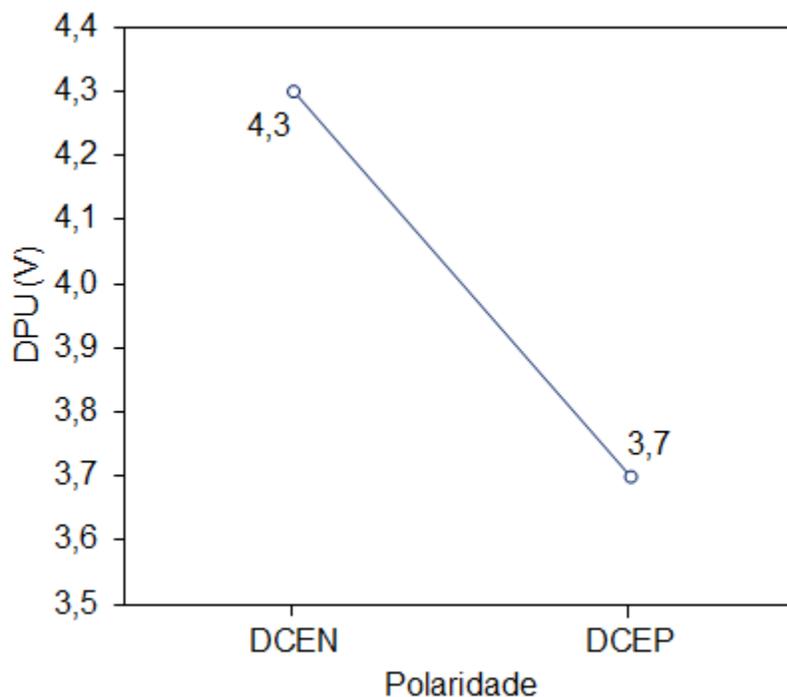
Figura 28 - Médias ajustadas obtidas para DPU. Interação entre frequência de pulso e profundidade.



Fonte: Autor

Em relação a polaridade, pode-se evidenciar na Figura 29, que o valor médio do desvio padrão da tensão diminui com a mudança de DCEN para DCEP, em 14%. Como é comentado por ARIF e CHUNG (2014), a instabilidade na polaridade direta é comum nos processos de arco voltaico, sendo um dos motivos para serem utilizadas fontes em AC. Este tipo de fontes permitem a combinação da alta taxa de deposição em DCEN e a estabilidade em DCEP, devido a que em DCEN o arco é mais instável. Adicionalmente, em experimentos executados na profundidade de 0,3 m na soldagem molhada de arame tubular, CASTELLANOS-GONZALEZ et al. (2024) demonstram que existe maior instabilidade em DCEN do que em DCEP, para os dois arames testados (oxidante e rutilico). Os autores obtiveram um incremento do KvU e da quantidade de curtos circuitos em DCEN.

Figura 29 - Gráfico do efeito da polaridade no desvio padrão da tensão

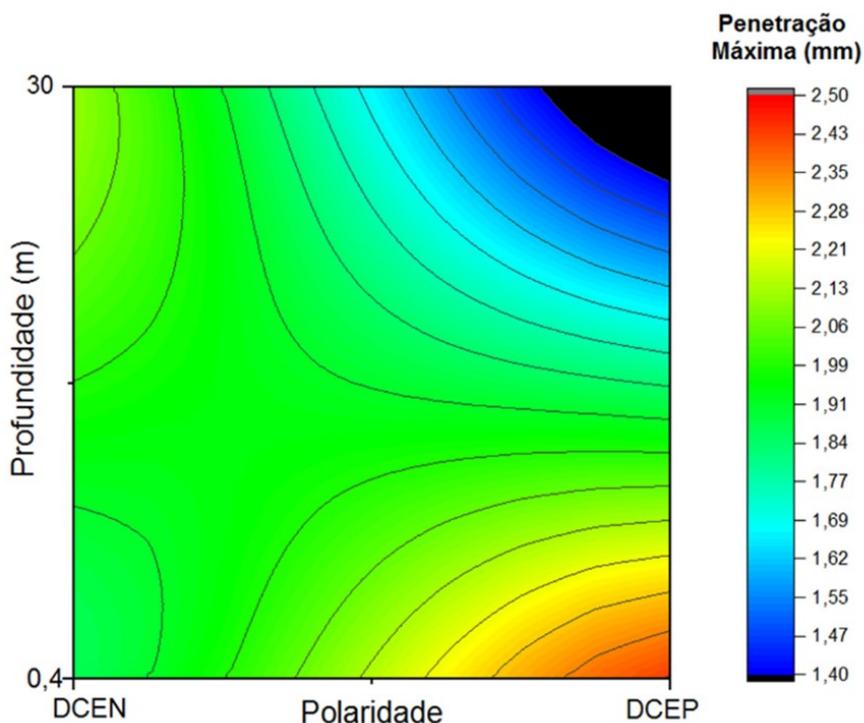


Fonte: Autor

4.3 Definição da morfologia do cordão de solda

Com o objetivo de descrever a penetração máxima foram plotados gráficos de contorno. Na Figura 30 nota-se que na profundidade de lâmina de água, a penetração máxima em DCEP é maior que em DCEN. Contudo, esse comportamento se inverte com o aumento da profundidade até 30 m. Em primeiro lugar, o comportamento da penetração máxima em lâmina de água é similar ao comentado por RONTESCU et al. (2015). Em DCEP aproximadamente o 70% do calor gerado pelo arco concentra-se no metal de base, provocando uma penetração profunda. Em segundo lugar, na profundidade de 30 m, existe uma relação similar ao relatado por PESSOA et al. (2004). Os autores obtiveram cordões em DCEP com menor penetração que DCEN na profundidade de 50 m. Além disso, segundo os dados da Tabela 5, a penetração máxima dos cordões em DCEN difere apenas em um acréscimo do valor médio de 12% quando aumenta a profundidade para 30 m. Por outro lado, na configuração DCEP, houve uma diminuição de 49% no valor médio da penetração máxima.

Figura 30 - Gráficos de contorno para a penetração máxima do cordão de solda. Interação entre profundidade e polaridade



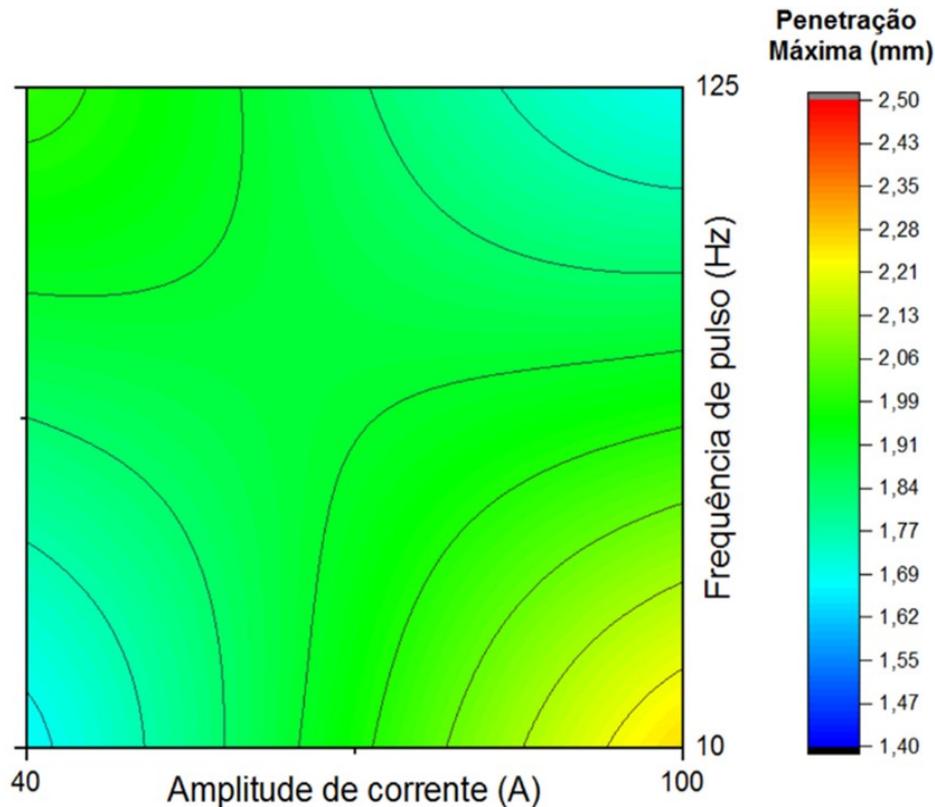
Fonte: Autor

Na equação de regressão (Apêndice D) se evidencia que o valor médio da penetração máxima é afetado pelo aumento da amplitude da corrente. FARIA et al. (2007), em experimentos executados com o processo GMAW-AC obtiveram maiores valores de penetração quando aumentaram o valor de corrente eficaz de 105 para 135 A nas três porcentagens de polaridade negativa testadas. Os autores comentaram que este aumento da penetração está associado a maior energia fornecida na solda. CORREIA e SCOTTI (2017), confirmaram mediante ANOVA unilateral que o aumento da penetração do cordão de solda no processo GTAW pulsado sem alimentação apresenta alta significância com o aumento do valor da corrente eficaz. Adicionalmente, nos experimentos executados por SUGA e HASUI (1988) também houve aumento da penetração média com a elevação da amplitude de corrente, para a mesma corrente média de 175 A e balanço de onda de 0,5.

Além disso, no nível superior da amplitude de corrente tem-se uma corrente de pulso maior (200 A). Em diversas publicações na literatura da tecnologia de soldagem a arco voltaico tem se discutido a relação entre a força eletromagnética de Lorentz e o jato de plasma com a penetração do cordão de solda. O fluxo de corrente elétrica gera campos magnéticos que interagem com os portadores de corrente e produzem as forças de Lorentz do corpo, essas forças induzem maior pressão no arco, resultando em jato de plasma. SAEDI e UNKEL (1988) atribuem o aumento de penetração a este fenômeno. DELGADO et al. (2018) mediante simulação de um processo a arco voltaico em uma atmosfera de CO₂, concluíram que uma maior intensidade de corrente transfere maior calor por convecção e radiação que um jato de plasma gerado por uma corrente de menor intensidade, provocando um jato de plasma mais intenso ao aumentar a corrente do arco. Os autores também comentam que esses resultados são produto de uma maior magnitude das forças de Lorentz, as quais são proporcionais à densidade de corrente. Também, KARADENIZ et al. (2007) sustentam que a intensidade da corrente de soldagem influencia significativamente a concentração de calor na poça de fusão e, portanto, afeta a profundidade de penetração.

A Figura 31 mostra a interação entre a amplitude de corrente e a frequência de pulso na definição da penetração máxima do cordão de solda. Inicialmente, para uma amplitude de corrente de 100 A, observa-se que a menor frequência de pulso (10 Hz) resulta no maior valor médio de profundidade de penetração. LEITNER et al. (1973) indicam que uma forma de onda de pulso com uma maior duração na corrente de pulso proporciona uma maior penetração. Nos experimentos de SUGA e HASUI (1988) se corrobora esta tendência. Entretanto, o gráfico de contorno da Figura 31 também se revela uma inversão desse comportamento para a amplitude de 40 A. Na frequência de pulso de 125 Hz acontece um acréscimo da penetração máxima em comparação com a frequência de 10 Hz. Esta tendência está relacionada com o desvio padrão da tensão. No apêndice D mostra-se a correlação negativa entre DPU e o valor médio da penetração. Assim, o aumento da rigidez do arco resultou em uma penetração mais profunda. Este comportamento também é mencionado por HUANG et al. (2020) no processo GMAW Pulsado em ambiente hiperbárico.

Figura 31 - Gráficos de contorno para a penetração máxima do cordão de solda. Interação entre amplitude de corrente e frequência de pulso

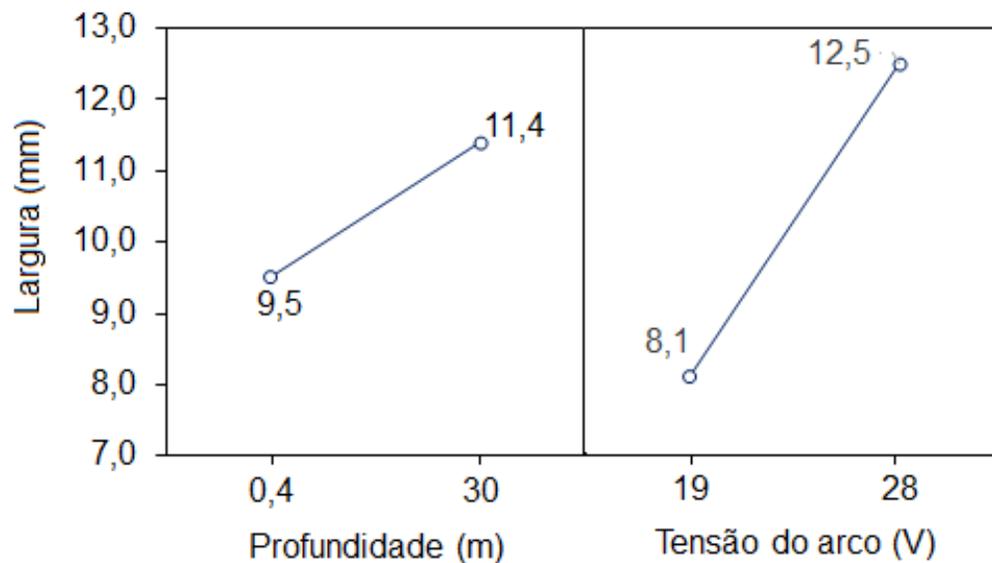


Fonte: Autor

Na Figura 32, são apresentadas as médias ajustadas da largura em função da profundidade e da tensão do arco. Pode-se observar que o valor médio da largura aumenta 1,9 mm na maior profundidade. Adicionalmente, nota-se um incremento do valor médio da largura de 4,4 mm com a tensão do arco. Pode-se inferir que um maior comprimento do arco está associado com uma maior largura. Resultados semelhantes foram evidenciados em experimentos realizados em condições atmosféricas por KURTULMUS et al. (2015) no processo FCAW, nos quais também foi observada essa mesma tendência. Adicionalmente, como será mostrado na inspeção visual dos cordões, houve uma maior largura em DCEP, com aumento da profundidade devido à deflexão do arco. Na Figura 33 se mostram as médias ajustadas da área de penetração em função da penetração máxima e largura. Pode-se observar que o valor médio da área de penetração aumenta 13,3 mm² com a mudança do nível inferior para o superior da penetração máxima. Por outro lado, o valor médio da área de penetração

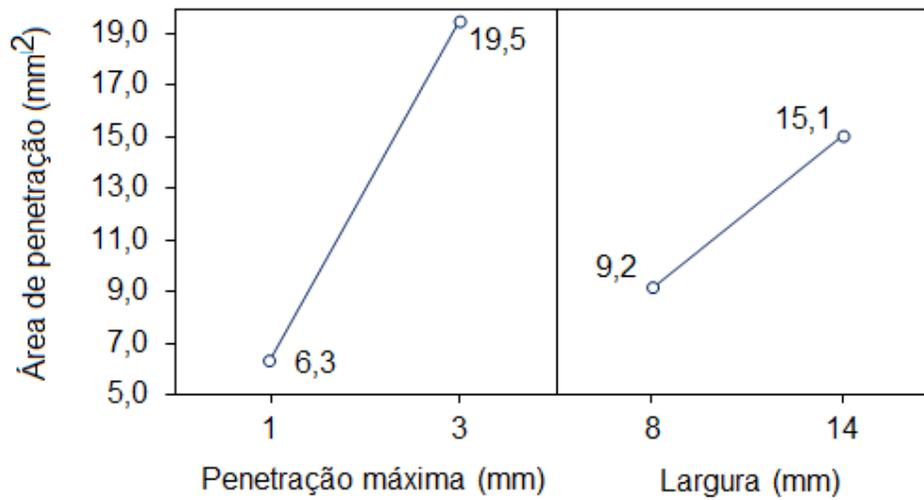
aumenta 5,9 mm² com a largura. Este resultado implica que a penetração máxima tem um efeito maior na área de penetração. Nos resultados apontados por SUGA e HASUI (1988), os quais se mostram na Figura 34, evidencia-se como a penetração máxima afeta com maior magnitude a área de penetração, em comparação com a largura do cordão. Na primeira seção do gráfico, mostra-se que a relação direta que existe entre a penetração máxima e a área de penetração. Na segunda seção do gráfico, para a mesma frequência de pulso, a penetração máxima e a área de penetração apresentam a mesma tendência. Em ambas seções pode ser visto que a relação entre a penetração e a área de penetração é forte, porém a largura não influencia muito.

Figura 32 - Médias ajustadas. Gráfico de efeito da profundidade e tensão do arco na largura do cordão de solda



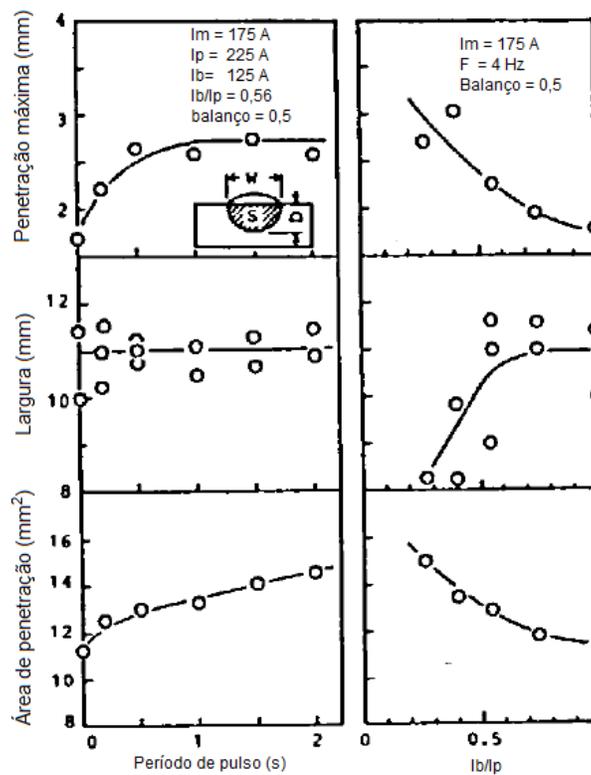
Fonte: Autor

Figura 33 - Médias ajustadas. Gráfico de efeito da penetração máxima e largura na área de penetração do cordão de solda



Fonte: Autor

Figura 34 - Penetração máxima, largura e área de penetração na soldagem molhada



Fonte: (SUGA e HASUI, 1988)

4.4 Inspeção Visual

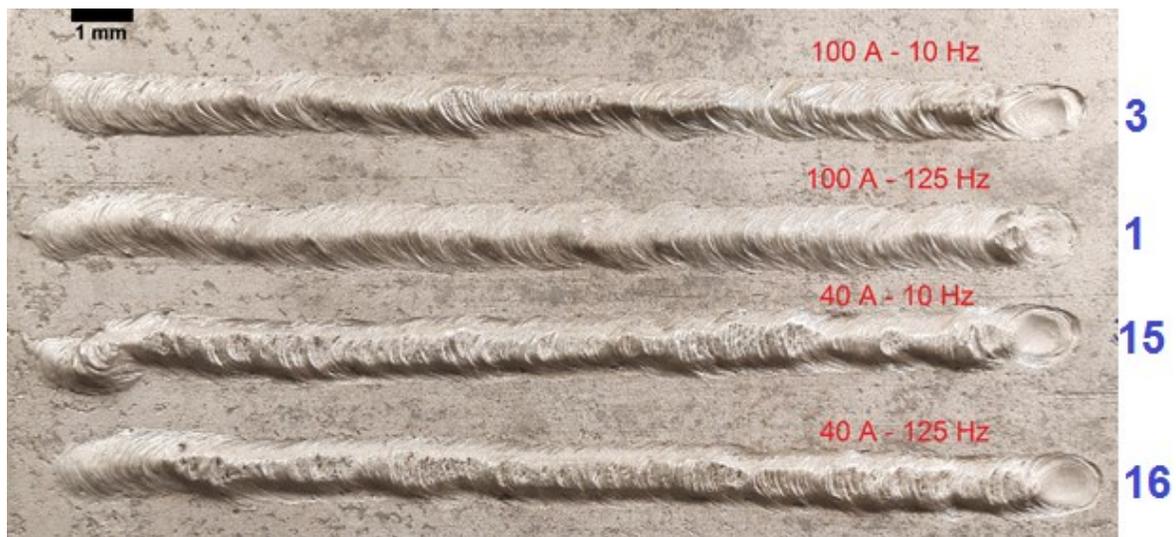
Examinou-se qualitativamente a aparência superficial dos cordões de solda em função de descontinuidades como porosidade superficial, mordedura e reforço excessivo. Foi analisado um cordão de solda por cada combinação de parâmetros experimentais. Adicionalmente, foram numerados de 1 até 16, sendo o cordão de solda 1 o de melhor qualidade e o 16 com a pior aparência superficial.

Na Figura 35 e na Figura 36, são mostrados os cordões de solda obtidos em 0,4 m, na polaridade inversa e direta, respectivamente. Pode-se evidenciar que os dois cordões com melhor qualidade superficial foram obtidos na maior amplitude de corrente e na frequência de 125 Hz (cordões 1 e 2). O aumento da frequência de pulso melhorou a molhabilidade do cordão de solda, além de ser obtido um reforço sem porosidade. A Figura 35 mostra que na amplitude de 40 A houve um detrimento da aparência superficial em ambas frequências de pulso, obtendo-se os cordões com a pior aparência superficial em lâmina d'água. Essa tendência também é mostrada na Figura 36 para a polaridade direta, onde os cordões com maior quantidade de irregularidades no reforço, foram obtidos na menor amplitude de corrente.

Na Figura 37, são mostrados os cordões de solda obtidos em DCEP na profundidade de 30 m. Para DCEP nota-se que não tem mordeduras como em lâmina de água, e a porosidade no reforço diminuiu. DA SILVA et al. (2012) explicam que a profundidade joga um papel importante na molhabilidade do cordão de solda, aumentando a largura e diminuindo o reforço, tal como acontece para DCEP em 30 m. Adicionalmente, pode-se notar que em DCEP existe deflexão do arco. No entanto, o aumento da frequência de pulso para 125 Hz em cada amplitude de corrente contrarrestou a deflexão devido ao aumento da rigidez do arco.

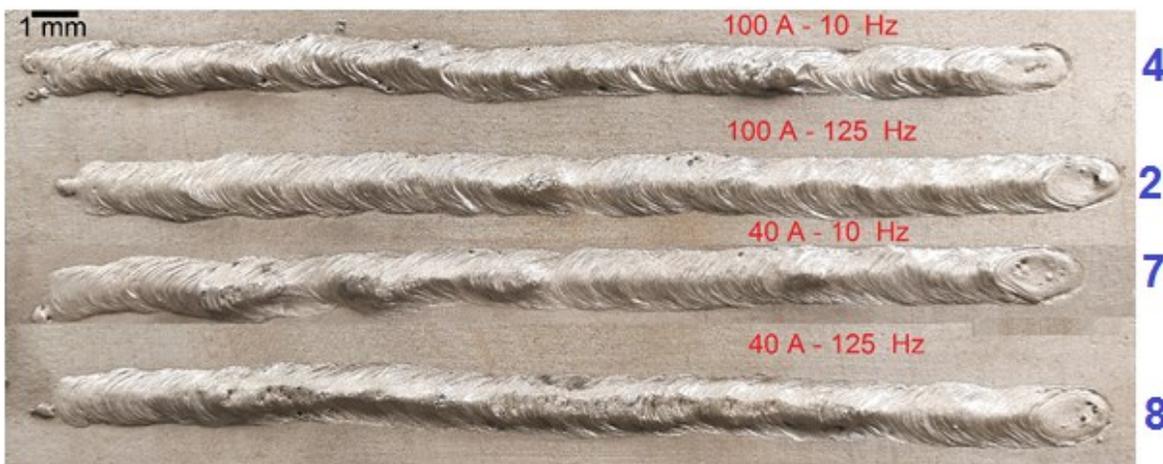
Na Figura 38, são mostrados os cordões de solda obtidos em DCEN na profundidade de 30 m. Se evidencia que nesta configuração de polaridade houve um deterioro da aparência superficial em comparação com DCEP na mesma profundidade.

Figura 35 – Cordões de solda obtidos com corrente pulsada na polaridade inversa em 0,4 m



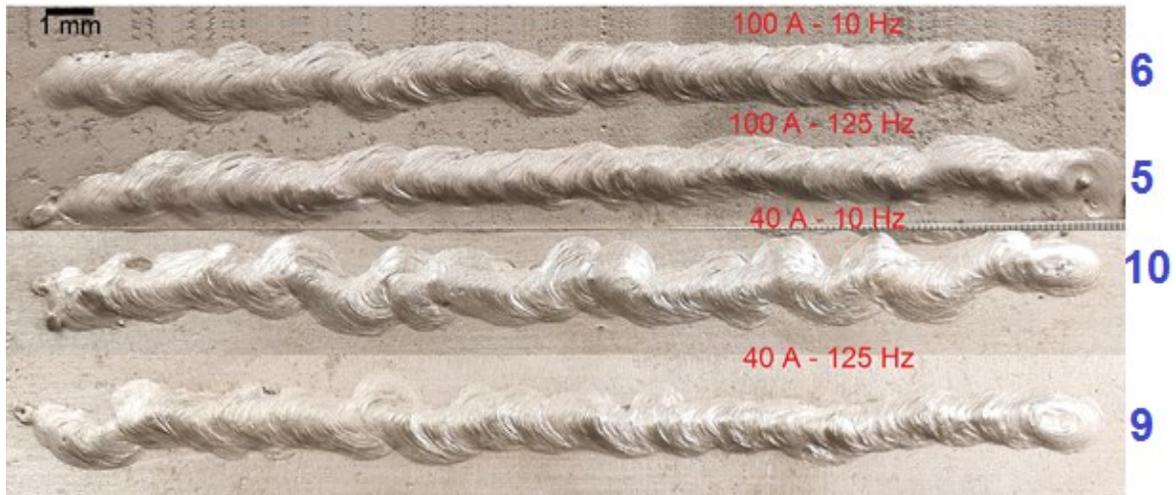
Fonte: Autor

Figura 36 – Cordões de solda obtidos com corrente pulsada na polaridade direta em 0,4 m



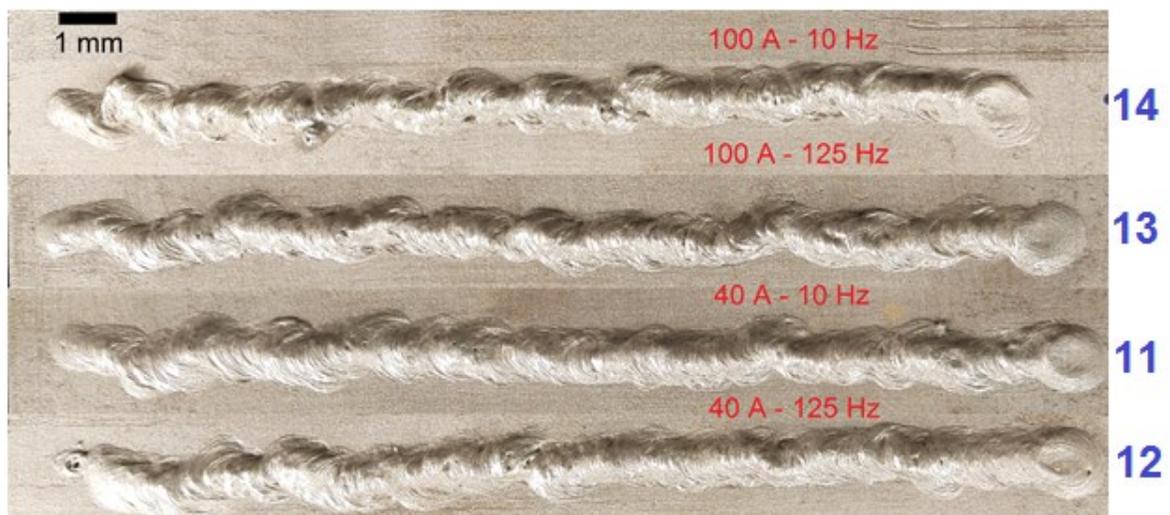
Fonte: Autor

Figura 37 – Cordões de solda obtidos com corrente pulsada na polaridade inversa em 30 m



Fonte: Autor

Figura 38 – Cordões de solda obtidos com corrente pulsada na polaridade direta em 30 m

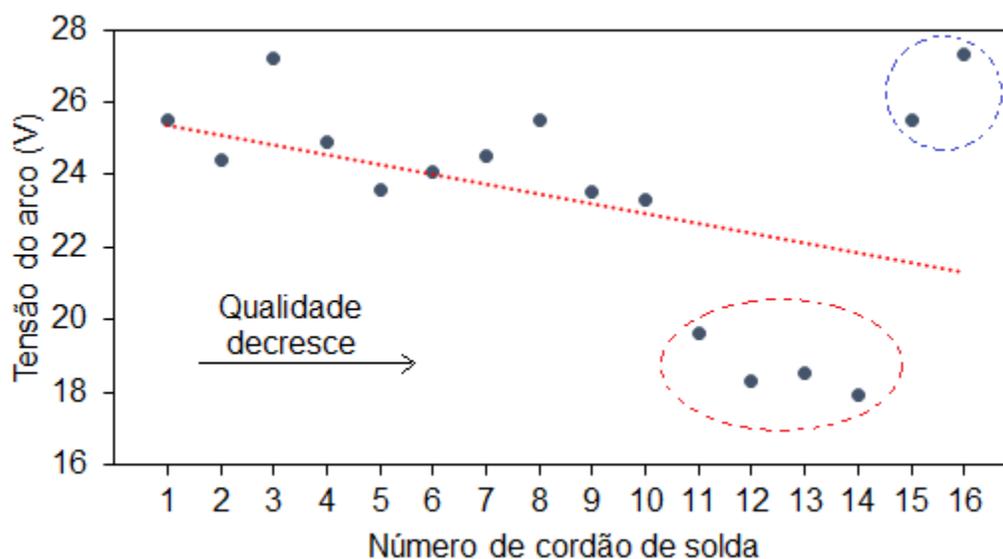


Fonte: Autor

Na Figura 39 é relacionada a qualidade superficial dos cordões obtidos, com a tensão de arco obtida em cada condição. Pode-se ver uma tendência da diminuição da qualidade do cordão de solda com a tensão do arco. Especificamente, a região vermelha representa com maior intensidade esta tendência. Adicionalmente, a região azul mostra que uma alta tensão

do arco também pode diminuir a qualidade do cordão de solda. Nestes cordões de solda foram identificadas a maior quantidade de poros na superfície, com reforço irregular ao longo do cordão de solda e uma molhabilidade inferior em comparação aos outros cordões de solda. Segundo CASTELLANOS-GONZALEZ et al. (2021), uma diminuição dos curtos circuitos também pode diminuir a qualidade do cordão de solda. Da mesma maneira, PESSOA et al. (2010) mencionam que para o eletrodo rutilico na soldagem molhada, obteve-se cordões de solda com menor qualidade quando se tem uma transferência metálica sem predominância de curtos circuitos. Adicionalmente, demonstra-se que existe uma tendência de que os cordões com melhor qualidade foram obtidos aproximadamente entre 24 e 26 V.

Figura 39 – Relação entre a tensão do arco e a qualidade dos cordões de solda



Fonte: Autor

Tal como explicam SANTOS et al. (2022), os eletrodos oxi-rutilicos tendem a apresentar problemas de soldabilidade, sendo de difícil manuseio para os mergulhadores, em comparação com os eletrodos rutilicos. Por tanto, este trabalho demonstrou que uso da corrente pulsada se apresenta como uma técnica promissória que melhora a operacionalidade de eletrodos revestidos na soldagem subaquática molhada. Por conseguinte, como pode-se inferir na literatura (PESSOA et al., 2004), o aumento da profundidade em combinação com a instabilidade, podem levar ao surgimento de discontinuidades. Provavelmente, é devido à

falta de densidade de energia suficiente para a manutenção do arco, somado a que uma transferência metálica com maior quantidade de curtos circuitos pode aumentar a porosidade (PEREZ-GUERRERO e LIU, 2007). Nesse sentido, o uso da frequência de 125 Hz demonstrou ser uma solução para modular o sinal de tensão do arco ao longo do processo de soldagem, auxiliando na manutenção do arco. Adicionalmente, a rigidez do arco foi melhorada na frequência de 125 Hz, o que diminuiu a deflexão do arco em DCEP na profundidade de operação de 30 m.

Em relação a inspeção visual, os resultados discutidos no presente trabalho evidenciaram que na profundidade de 0,4 m, foram obtidos cordões com excelente qualidade superficial e ótima molhabilidade, na amplitude de 100 A e na frequência de 125 Hz, em ambas polaridades. Adicionalmente, uma amplitude de corrente de 100 A e uma frequência de 125 Hz pode ser usada para garantir uma boa estabilidade do arco para um baixo valor médio da área de penetração (menor diluição). Adicionalmente, uma amplitude de 40 A e uma frequência de 125 Hz pode ser utilizada quando for necessário um valor de penetração máxima maior, mantendo também a estabilidade do arco.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho demonstrou-se o controle eletrônico de corrente para o estudo da influência de parâmetros de corrente pulsada na soldagem molhada com um eletrodo oxidilico. Com a corrente média em 150 A e o balanço da onda em 50 % para todos os experimentos, pode-se concluir o seguinte:

- A aparência superficial dos cordões difere amplamente na profundidade e polaridade de corrente. Em lâmina de água, os cordões em DCEN tendem a ter melhor aspecto superficial do que os cordões de solda obtidos em DCEP. Todavia, este comportamento se inverte com o aumento da profundidade. Provavelmente uma maior instabilidade em DCEN deteriora a aparência superficial do cordão em 30 m. Adicionalmente, notou-se uma maior deflexão do arco em DCEP na profundidade de 30 m, que foi diminuída com o aumento da frequência de pulso.
- A taxa de fusão é maior na amplitude de corrente de 100 A em comparação com 40 A, devido a uma maior corrente eficaz. Adicionalmente, pode ser obtido maior aquecimento por efeito joule na menor frequência de pulso do que na maior frequência de pulso, nos dois níveis de amplitude de corrente, sem importar a polaridade ou a profundidade de operação.
- Na soldagem atmosférica de arame maciço com corrente pulsada, o aumento da corrente eficaz pode melhorar a estabilidade do processo. No entanto, na soldagem molhada, para a mesma corrente média um aumento da corrente eficaz poderia provocar instabilidade devido a correntes de base baixas, as quais podem afetar o rendimento do processo em altas profundidades. A constrição do arco devido a pressão hidrostática demanda uma maior densidade de corrente, a qual é insuficiente nos períodos de duração da corrente de base, dificultando a manutenção do arco. Portanto, deve ser considerado o aumento da frequência de pulso como uma estratégia para mitigar a instabilidade em correntes de base baixas.

- A tensão do arco está determinada pela polaridade, profundidade e taxa de fusão. Obteve-se maiores valores médios da tensão do arco em DCEP, o que está de acordo ao modelo apresentado por TSAI e MASUBUCHI (1977). Além disso, o valor médio da tensão do arco diminuiu com a profundidade. Adicionalmente, em relação a taxa de fusão, estabeleceu-se que incrementa a fusão instantânea na ponta do eletrodo, aumentando o comprimento do arco. Em consequência, a tensão do arco incrementou.
- A penetração máxima do metal de solda pôde-se aumentar mediante dois mecanismos. O primeiro ocorre quando na amplitude de corrente de 100 A, a profundidade de penetração é mais elevada na frequência de 10 Hz, em comparação com 125 Hz. Isto está relacionado com uma maior duração da corrente de pulso. Em contrapartida, no segundo cenário, pôde-se aumentar a penetração máxima do cordão de solda na menor amplitude de corrente (40 A), na configuração de 125 Hz. Isto está relacionado com uma maior rigidez do arco. Adicionalmente, comprovou-se que uma maior força do jato de plasma devido a uma maior corrente de pulso, e uma maior corrente eficaz, também incrementam a penetração máxima.
- A área de penetração pôde ser definida pela largura e penetração máxima. Contudo, esta última variável influencia com maior intensidade a área de penetração.

6 REFERÊNCIAS

ANDRADE, L. G. D.; DIAS, W. C.; RIBEIRO, L. F.; BRACARENSE, A. Q.; PESSOA, E. C. P.; LIU, S. Efeito do teor de carbono do metal de base e da alma do eletrodo revestido sobre a porosidade em soldas molhadas. *Soldagem & Inspeção*, v. 15, n. 2, p. 156–164, 2010.

ARIF, N.; CHUNG, H. Alternating current-gas metal arc welding for application to thin sheets. *Journal of Materials Processing Technology. Journal of Materials Processing Technology*, v. 214, n. 9, p. 1828-1837, 2014.

ASSUNÇÃO, M. T.; BRACARENSE, A. Q. Evaluation of the Effect of the Water in the Contact Tip on Arc Stability and Weld Bead Geometry in Underwater Wet FCAW. *Soldagem & Inspeção*, vol. 22, n. 4, p. 401-412, 2017.

BAILEY, N.; COE, F.R.; GOOCH, T.G.; HART, P.H.M.; JENKINS, N.; PARGETER, R. J. *Welding Steels Without Hydrogen Cracking*, 2da Ed. England: Woodhead, 1993.

BERNARDI, R. Investigações de ordem operacional e implementação de tecnologias para soldagem subaquática molhada com eletrodos revestidos. Universidade Federal de Santa Catarina. Dissertação de Mestrado, 2018.

BRACARENSE, A. Q.; PESSOA, E. C. P.; DOS SANTOS, V. R.; MONTEIRO, M. J.; RIZZO, F. C.; PACIORNIK, S.; REPPOLD, R.; DOMINGUES, J. R.; VIEIRA, L. A. Estudo comparativo de eletrodos comerciais para soldagem subaquática molhada. *Soldagem & Inspeção*, vol. 15, n. 4, p. 325-335, 2009.

CAMPOS, E.; MORENO, A. M.; BRACARENSE, A. Q. Effects of PTFE on operational characteristics and diffusible H and O contents of weld metal in underwater wet welding. *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 61, p 270-279, 2021.

CASTELLANOS-GONZALEZ, O. M.; MORENO-URIBE, A. M.; RAMON-RAMON, S. A.; JACOME, J. L. Evaluación de la transferencia metálica y estabilidad del proceso GMAW. *Revista UIS Ingenierías*, vol. 20, n. 3, 2021.

CASTELLANOS-GONZALEZ, M.; RODRIGUEZ, A.; GONÇALVES, R.. Análise exploratória do comportamento da tensão do arco na soldagem molhada com eletrodos revestidos utilizando uma fonte eletrônica especializada. Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia mecânica da UFMG, Belo Horizonte, Brasil. ISBN: 978-85-5722-514-5, 2022a.

CASTELLANOS-GONZALEZ, O. M.; MORENO-URIBE, A. M.; RODRÍGUEZ, A.; JÁCOME, J. Particularidades de la transferencia metálica y la aplicación de corriente pulsada en soldadura submarina. *Revista UIS Ingenierías*, vol. 21, n. 4, p. 1-14, 2022b.

CASTELLANOS-GONZALEZ, O. M.; MORENO-URIBE, A. M.; RODRÍGUEZ, A.; SANCHEZ, E. J.; FAGUNDES, J. G.; SILVA, B. An analysis of operational performance and weld bead characteristics of experimental tubular wires for underwater wet welding. 2024.

CHEN, H.; GUO, H.; SHI, X.; DU, Y.; FENG, J.; WANG, G. Effect of hydrostatic pressure on protective bubble characteristic and weld quality in underwater flux-cored wire wet welding. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 259, p. 159-168, 2018.

CHENG, F.; HU, S.; GAO, W.; DENG, C.; WANG, D.; JING, H. Diffusible hydrogen content and microstructure characteristic in the joint by underwater shielded metal arc welding. *Materials Science*, vol. 35, n. 9, p. 45-48, 2014.

CORREIA, D.; SCOTTI, A. Using either Mean or RMS values to represent current in modeling of arc welding bead geometries. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 240, p. 382 – 387, 2017.

CUNHA, T. Proposta de Roteiro para a Determinação das Variáveis de Soldagem do Processo TIG Pulsado Aplicado à Soldagem de Chapas Finas. *Soldagem & Inspeção*, vol. 18, n. 1, p. 64-71, 2013.

CUNHA, T. V.; VOIGT, A. L.; BOHORQUEZ, C. E. Analysis of mean and RMS current welding in the pulsed TIG welding process. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 231, p. 449-455, 2016.

DA SILVA, W.; BRACARENSE, A. Q.; PESSOA, E. C. P. Efeito da Profundidade de Soldagem no Hidrogênio Difusível de Soldas Molhadas. *Soldagem & Inspeção*, vol. 17, n. 4, p. 298-305, 2012.

DELGADO, J. A.; MÉNDEZ, P.; RAMÍREZ-ARGÁEZ, M. A. Efecto de la corriente y longitud de arco en soldadura por arco eléctrico en CO₂ mediante simulación numérica. *Prisma Tecnológico*, vol. 9, n. 1, 2018.

DE MELLO, F.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Aspectos Operacionais da Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodos Revestidos Inoxidável Austenítico. *Soldagem & Inspeção*, vol. 23, pp. 277–291, 2018.

DUTRA, J. C.; MARQUES, C.; GONÇALVES, R. Consonâncias e Dissonâncias Interpretativas no Inter-relacionamento das Variáveis da Corrente Pulsada Aplicada à Soldagem com arame de Alumínio 4043. *Soldagem & Inspeção*, vol. 7, no. 3 pp. 201–209, 2012.

FARIA, J. P.; MIRANDA, H. C; MOTTA, M. F; DE QUEIROZ; F. D; PESSOA, E. F. Effect of square-wave AC GMAW on weld beam geometry. *Welding International*, vol. 21, n. 3, pp. 212-219, 2007.

FENG, J.; WANG, J.; SUN, Q.; ZHAO, H.; WU, L.; XU, P. Investigation on dynamic behaviors of bubble evolution in underwater wet flux-cored arc welding. *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 28, n.1, p. 156-167. 2017.

FERREIRA, F., PACIORNIK, S., DOS SANTOS, V. & BRACARENSE, A. (2010). Evaluation of the effects of replacement of hematite by wustite on oxidizing electrodes coating for underwater wet welding. 65th ABM International Congress, 18th IFHTSE Congress and 1st TMS/ABM International Materials Congress, pp. 2266-2276, 2010

FIGUEIREDO-FILHO, D. B.; SILVA-JÚNIOR, J. A. D. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). *Revista Política Hoje*, vol. 18, n.1, 2009.

FYDRYCH, D.; ŚWIERCZYŃSKA, A.; ROGALSKI, G. Effect of underwater wet welding conditions on the diffusible hydrogen content in deposited metal. *La Metallurgia Italiana*, n. 11, 2015.

FYDRYCH, D.; ROGALSKI, G. Effect of underwater local cavity welding method conditions on diffusible hydrogen content in deposited metal. *Welding International*, vol. 27, n. 3, p. 196-202, 2013.

GONÇALVES, R.; RODRIGUES, R.; DOS SANTOS, F.; MOREIRA, A.; OLIVEIRA, U. Metallic Droplet, Weld Pool Temperatures Evaluation and Pulsed Wave Formulation in the Pulsed GMAW. *Materials Research*, vol.23, no. 4, 2019.

GUO, N.; CHENG, Q.; FU, Y.; DU, Y.; ZHANG, X.; FENG, J. Investigation on the mass transfer control, process stability and welding quality during underwater pulse current FCAW for Q235. *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 46, p. 317-327, 2019.

HUANG, S.; ZHANG, Y.; JIAO, X.; ZHOU. Effects of Welding Parameters of Pulsed Gas Metal Arc Welding on Microstructure and Mechanical Performance of Joints Welded in

Hyperbaric Environment. *Annales de Chimie - Science des Matériaux*, vol. 44, n. 4, August, pp. 287-294, 2020.

IBARRA, S.; GRUPPS, C. E.; LIU, S. State-of-the-Art and Practice of Underwater Wet Welding of Steel. Proceedings: International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures. New Orleans: Estados Unidos. 49- 67, 1994.

JIA, C.; WU, J.; HAN, Y.; ZHANG, Y.; YANG, Q.; WU, C. S. Underwater Pulse-Current FCAW — Part 1: Waveform and Process Features. *Welding Research*, vol. 99, n. 5, p. 135-145, 2020.

KAH, P. *Advancements in Intelligent Gas Metal Arc Welding Systems: Fundamentals and Applications*. Elsevier, 2021.

KARADENIZ, E; OZSARAC, U.; YILDIZ, C. The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding process. *Materials and Design*, vol. 28, n. 2, pp. 649-656, 2007.

KHAN, M. I.; ANSARI, Y. A.; ALAM, S. Comparative study of the response of commercially available electrodes to underwater welding and air welding. *International Journal of Technical Research and Applications*, vol. 3, n. 4, 2015.

KLETT, J.; HASSEL, T. Reducing the risk of hydrogen-induced cold cracks in hyperbaric wet welding of high-strength steels by using austenitic welding consumables. *Welding and Cutting*, vol. 19, n. 1, p. 54-60, 2020.

KLETT, J.; MATTOS, I.; HANS, J.; GONÇALVES, R.; HASSEL, T. Control of the diffusible hydrogen content in different steel phases through the targeted use of different welding consumables in underwater wet welding. *Materials and corrosion*, vol. 72, n. 2, p. 504-516, 2020a.

KLETT, J.; OLIVER, G.; SCHMIDT, E.; LINOWITZKI, V. Effect of the water depth on the hydrogen content in SMAW wet welded joints. *Springer*, 2020b.

KURTULMUS, M.; YUKLER, A.; BILICI, M.; CATALGOL, Z. Effects of welding current and arc voltage on FCAW weld bead geometry. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, eISSN: 2319-1163, 2015.

LABANOWSKI, J., FYDRYCH, D.; ROGALSKI, G. Underwater Welding - A Review. *Revista Advances in Materials Sciences*, vol. 8(3), 11-22, 2008.

LARA, R. F.; MORENO-URIBE, A.; BRACARENSE, A. Q. Development of a hatch system for the determination of diffusible hydrogen in underwater welding. *Respuestas*, vol. 25, n.1, 2020.

LEITNER; MCELHINNEY; PRUITT. An Investigation of Pulsed GTA Welding Variables. *Welding research supplement*, Paper was presented at the 54th AWS Annual Meeting held at Chicago during, April 2-6, 1973.

LIU, S.; OLSON, D.; SMITH, C.; SPENCER, J. International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures, 1990.

LIU, S.; OLSON, D. L.; IBARRA, S. Electrode formulation to reduce Weld metal hydrogen and porosity. Documento presentado en el OMAE, Estados Unidos: ASME, 1994.

MAZZAFERRO, J. A. E.; MACHADO, I. G. Study of arc stability in underwater shielded metal arc welding at shallow depths. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 223, n. 3, p. 699- 709, 2009.

MENDONÇA, C. Investigação do fenômeno das bolhas em soldagem subaquática molhada com arame tubular auto protegido. Universidade Federal de Minas Gerais. Dissertação, 2019.

MONTGOMERY et al. Introduction to Linear Regression Analysis. Fifth Edition, 2012.

MORENO-URIBE, A. M.; BRACARENSE, A. Q.; PESSOA, E. C. P.; SANTOS, V. R. Influência da Polaridade Sobre a Estabilidade do Processo de Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodo Revestido. *Soldagem & Inspeção*, vol. 22, n. 4, p. 29-41, 2017.

MORENO-URIBE, A. M. Efeito da polaridade sobre a morfologia e estabilidade de soldas subaquáticas molhadas com eletrodos E6013 e WW70. Universidade Federal de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, 2018.

MORENO-URIBE, A. M. Efeito dos parâmetros do processo de soldagem subaquática molhada sobre o teor de hidrogênio difusível. Universidade Federal de Minas Gerais. Qualificação doutorado, 2020.

MORENO-URIBE, A. M.; BRACARENSE, A. Q.; PESSOA, E. C. The effect of polarity and hydrostatic pressure on operational characteristics of rutile electrode in underwater welding. *Materials*, vol. 13, n. 21, 2020.

MORENO-URIBE, A. M.; MODENESI, P. *Fundamentos de la física del arco eléctrico en soldadura*. Ecoe Ediciones S.A.S., 2022.

MORENO-URIBE, A. M., VACCARI, L.; BRACARENSE, A. Q.; HASSEL, T.; MAIER, H. An exploratory study on operational performance of pulsed-shielded metal arc underwater welding (P-SMAUW); 2023.

NIXON, J.; BILLINGHAM, J. A survey of underwater welding techniques. *Revista Endeavour*, vol. 11, n. 3, p. 143-148, 1987.

NIXON, J.; GRAHAM, S. R. B. Arc instability in shallow water wet welding, 1993.

OMAJENE, J.; MARTIKAINEN, J.; KAH, P.; PIRINEN, M. Fundamental Difficulties Associated With Underwater Wet Welding. *Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 4, n. 6, p. 26 -31, 2014.

OZAKI, H.; NAIMAN, J.; MASUBUCHI, K. A. Study of Hydrogen Cracking in Underwater Steel Welds. *Welding Research Supplement, Pennsylvania*, 231-237, 1977.

PAYÃO, J. D. C. Reações metalúrgicas na Soldagem Subaquática Molhada. *Soldagem & Inspeção*, p. 94-102, 2003.

PEREZ-GUERRERO, F.; LIU, S. Explaining Porosity Formation in Underwater Wet Welds. *Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2007.

PESSOA, E. C. P.; BRACARENSE, A. Q.; LIU, S.; PEREZ-GUERRERO, F. Study of “Re-Melt” Temper Bead and Polarity Effects on Porosity in the Under Freshwater Wet Welds. *ASME 2004 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - Vancouver, British Columbia, Canada*, vol. 2, p. 681–687. 2004.

PESSOA, E. C. P.; BRACARENSE, A. Q.; ZICA, E.; LIU, S.; PEREZ-GUERRERO, F. Porosity Variation along Multipass Underwater Wet Welds and its Influence on Mechanical Properties. Elsevier, 2006.

PESSOA, E. C. P. Study of Porosity Variation along Underwater Wet Welds. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: Thesis. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

PESSOA, E. C. P.; RIBEIRO, L.; BRACARENSE, A., et al. Arc stability indexes evaluation on underwater wet welding. In *Proceedings of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 2010.

PESSOA, E.; LIU, S. The State of the Art of Underwater Wet Welding Practice: Part 1. *Welding Journal*, 2021a.

PESSOA, E.; LIU, S. The State of the Art of Underwater Wet Welding Practice: Part 2. *Welding Research*, 2021b.

POPE, A.M.; LIU, S. Hydrogen Content of Underwater Wet Welds Deposited by Rutile and Oxidizing Electrodes, OMAE, Volume III, Mechanical Engineering, 1996.

POPE, A. M.; TEIXEIRA, J. C.; BAIXO, C.; TEICHMANN, E.; DUTRA, J. Influence of power supply dynamic response on underwater wet welding arc stability. 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1998.

REIS, P.; GONÇALVES, A.; MENDONÇA, F.; DA MOTA, P; DE SOUZA, R.; SCOTTI, A. Influência do material de base sobre o rendimento de fusão em soldagem a arco. *Soldagem & Inspeção*, vol. 16, no. 4, 2011.

RIBEIRO-MENEZES, P.; PESSOA, E.; BRACARENSE, A. Comparison of underwater wet welding performed with silicate and polymer agglomerated electrodes. *JMPT*, vol. 266, p. 63-72, 2019.

RONTESCU, C.; DUMITRU, T.; IACOBESCU, G.; AMZA, C. The Influence of the Welding Current Polarity on the Geometric Configuration of the Bead. *Advanced Materials Research*, v. 1088, p. 797-801, 2015.

SAEDI, H. R.; UNKEL, W. Arc and Pool Behavior for Pulsed Current GTAW. *Welding Journal*, vol. 67, n. 11, 1988.

SANCHEZ-OSIO, A.; LIU, S. OLSON, D. L.; IBARRA, S. Designing Shielded Metal Arc Consumables for Underwater Wet Welding in Offshore Applications, 1995.

SANTOS, V. R.; MONTEIRO, M. J.; RIZZO, F. C.; BRACARENSE, A. Q.; PESSOA, E. C. P.; MARINHO, R. R.; VIEIRA, L. A. Development of an Oxynitride Electrode for Wet Welding. *Welding Journal*, vol. 91, pp. 319-328, 2012.

SCOTTI, A.; GOMES, M.; PEREIRA, J. Use assessment of electronic power sources for SMAW, 1999.

SOUZA, D.; RESENDE, A.; SCOTTI, A. Um Modelo Qualitativo para Explicar a Influência da Polaridade na Taxa de Fusão no Processo MIG/MAG. *Soldagem e Inspeção*, vol. 14, n. 3, p. 192-198, 2009.

SUGA, Y. Effect of Diffusible Hydrogen on Mechanical Properties of Underwater Welded Joints – Study on Improving the Mechanical Properties of Underwater Welded Joints (The 1st Report)- *Transactions of the Japan Welding Society*, vol. 16, n. 2, 1985.

SUGA, Y.; HASUI, A. On formation of porosity in underwater weld metal. *Transactions of the Japan Welding Society*, vol. 17(1), 1986.

SUGA, Y.; HASUI, A. Underwater gravity pulsed arc welding. *Welding International*, vol. 2, n. 9, p. 802-807, 1988.

SUGA, Y.; HASUI, A. The Effect of Pressure on Welding Results and Welding Phenomena in Gravity Arc Welding. Japan Welding Society, 1990.

TOMKÓW, J.; JANECZEK, A. The influence of the welding environment on the properties of Tekken joints made from S355J2C+N steel. *Revista Welding Technology*, vol. 91, n. 1, p. 231-246, 2019.

TREVISAN, R. E. The fundamentals of Welding Pore Formation. Elsevier Science Publishers, p. 79-115, 1990.

TSAI, C. L.; MASUBUCHI, K., Interpretive report on underwater welding. *Weld. Res. Council Bull*, vol. 224, p 1–37, 1977.

WATSON, P. D. Fitness for service Design Application for Underwater Wet Welds. *International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures*, pp. 2010-236. Louisiana, USA, 1994.

WU, J.; HAN, Y.; JIA, C.; WU, C.; YANG, Q. Underwater Pulse-Current FCAW — Part 2: Bubble Behaviors and Waveform Optimization. *Welding Research*, 2020.

XU, J.; ZHOU, X.; ZHU, D. Effect of Arc Length on Oxygen Content and Mechanical Properties of Weld Metal during Pulsed GMAW. *Crystals*, vol. 12, n. 2, 2022.

ZONATO, W.; DROUBI, L.; HOCHHEIM, N. Pressupostos clássicos dos modelos de regressão linear e suas implicações sobre as avaliações em massa, 2018.

Apêndices

APÊNDICE A – Modelo final da taxa de fusão

1.) Definição do modelo inicial

As regressoras iniciais do modelo para a taxa de fusão, são as seguintes:

Variável resposta	Regressoras do modelo inicial na RLM
Taxa de fusão	A+B + C + D + AB+ AC + AD + BC + BD + CD + tensão do arco

Onde A = Amplitude de pulso, B = frequência de pulso, C = polaridade, D = profundidade, e AB, AC, AD, BC, BD e CD são as suas interações.

2.) Eliminação de regressoras

Tal como foi efetuado por ASSUNÇÃO e BRACARENSE (2017), foram removidas as variáveis e interações que não apresentaram significância mediante ANOVA, construindo assim modelos parciais que fossem representados pelas variáveis explicativas que permitiram a probabilidade de obter um valor F para cada efeito com um nível de confiança superior ou igual a 95 %.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)
Regressão	11	19,2164	99,21%	19,2164	1,74695
Amplitude de corrente	1	0,6840	3,53%	0,5359	0,53589
Frequência de pulso	1	0,7277	3,76%	0,0293	0,02926
Polaridade	1	4,0426	20,87%	0,1603	0,16034
Profundidade	1	3,7688	19,46%	0,1695	0,16949
U	1	6,2285	32,16%	0,0123	0,01230
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	1	0,0419	0,22%	0,0863	0,08627
Amplitude de corrente*Polaridade	1	0,5536	2,86%	0,0106	0,01057
Amplitude de corrente*Profundidade	1	0,0312	0,16%	0,0570	0,05696
Frequência de pulso*Polaridade	1	0,1943	1,00%	0,0318	0,03184
Frequência de pulso*Profundidade	1	0,2555	1,32%	0,1524	0,15244
Polaridade*Profundidade	1	2,6884	13,88%	2,6884	2,68841
Erro	36	0,1531	0,79%	0,1531	0,00425
Falta de ajuste	35	0,1529	0,79%	0,1529	0,00437
Erro puro	1	0,0002	0,00%	0,0002	0,00020
Total	47	19,3695	100,00%		

Fonte	Valor F	Valor-P
Regressão	410,90	0,000
Amplitude de corrente	126,05	0,000
Frequência de pulso	6,88	0,013
Polaridade	37,71	0,000
Profundidade	39,87	0,000
U	2,89	0,098
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	20,29	0,000
Amplitude de corrente*Polaridade	2,49	0,124
Amplitude de corrente*Profundidade	13,40	0,001

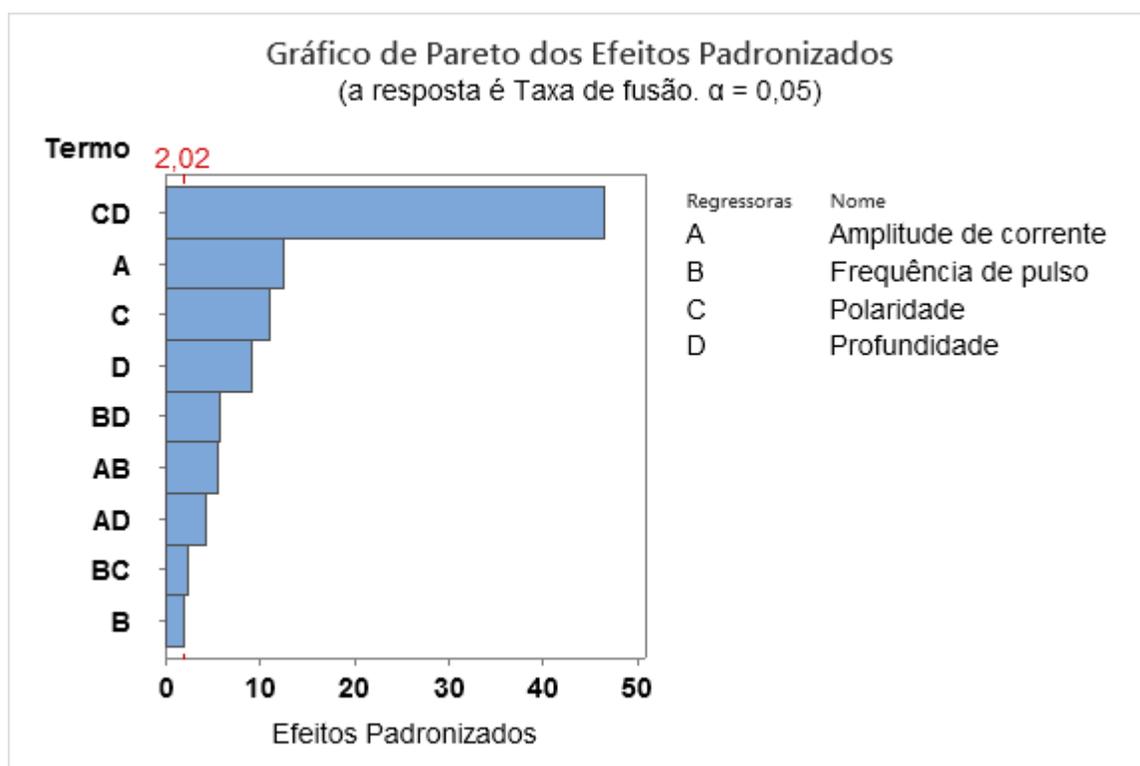
Frequência de pulso*Polaridade	7,49	0,010
Frequência de pulso*Profundidade	35,86	0,000
Polaridade*Profundidade	632,34	0,000
Erro		
Falta de ajuste	21,84	0,168
Erro puro	*	*
Total		

Como pode ser visto, a *tensão do arco* e *amplitude de corrente*polaridade*, são regressoras do modelo que apresentam um Valor-P > 0,05. Por conseguinte, serão removidas. Posteriormente, será executada uma nova análise de regressão com as regressoras remanescentes.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)
Regressão	9	19,2006	99,13%	19,2006	2,13340
Amplitude de corrente	1	0,6840	3,53%	0,7067	0,70665
Frequência de pulso	1	0,7277	3,76%	0,0193	0,01929
Polaridade	1	4,0426	20,87%	0,5366	0,53656
Profundidade	1	3,7688	19,46%	0,3783	0,37826
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	1	0,1376	0,71%	0,1376	0,13760
Amplitude de corrente*Profundidade	1	0,0825	0,43%	0,0825	0,08250
Frequência de pulso*Polaridade	1	0,0257	0,13%	0,0257	0,02567
Frequência de pulso*Profundidade	1	0,1463	0,76%	0,1463	0,14630
Polaridade*Profundidade	1	9,5855	49,49%	9,5855	9,58547
Erro	38	0,1689	0,87%	0,1689	0,00444
Falta de ajuste	37	0,1687	0,87%	0,1687	0,00456
Erro puro	1	0,0002	0,00%	0,0002	0,00020
Total	47	19,3695	100,00%		
Fonte	Valor F	Valor-P			
Regressão	480,09	0,000			
Amplitude de corrente	159,02	0,000			
Frequência de pulso	4,34	0,044			
Polaridade	120,74	0,000			
Profundidade	85,12	0,000			
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	30,97	0,000			
Amplitude de corrente*Profundidade	18,57	0,000			
Frequência de pulso*Polaridade	5,78	0,021			
Frequência de pulso*Profundidade	32,92	0,000			
Polaridade*Profundidade	2157,07	0,000			
Erro					
Falta de ajuste	22,79	0,165			
Erro puro	*	*			
Total					

Evidencia-se que todas as regressoras possuem um Valor- $P \leq 0,05$. No entanto, devido a que o modelo tem muitas variáveis e dificulta sua análise, procede-se a eliminar regressoras em função do impacto na resposta. Tal como explica Montgomery et al. (2012), podem eliminar-se variáveis que produzam um impacto menor na resposta, com a finalidade de obter um modelo mais simples. FYDRYCH et al. (2015) utilizaram diagrama de Pareto para avaliar o impacto das regressoras na resposta. Nesse sentido, O gráfico de Pareto dos efeitos padronizados, o qual foi construído com um nível de significância de 0,05, ou seja, existe uma probabilidade de menos do 5% de que a associação entre a variável independente e a variável dependente seja devido ao acaso, indica que a *frequência de pulso*, *frequência de pulso*polaridade* e *amplitude de corrente*profundidade*, são regressoras que contam com uma magnitude cuja mudança provavelmente gere um menor impacto na resposta. Por conseguinte, serão removidas. Posteriormente, será executada uma nova análise de regressão com as regressoras remanescentes.

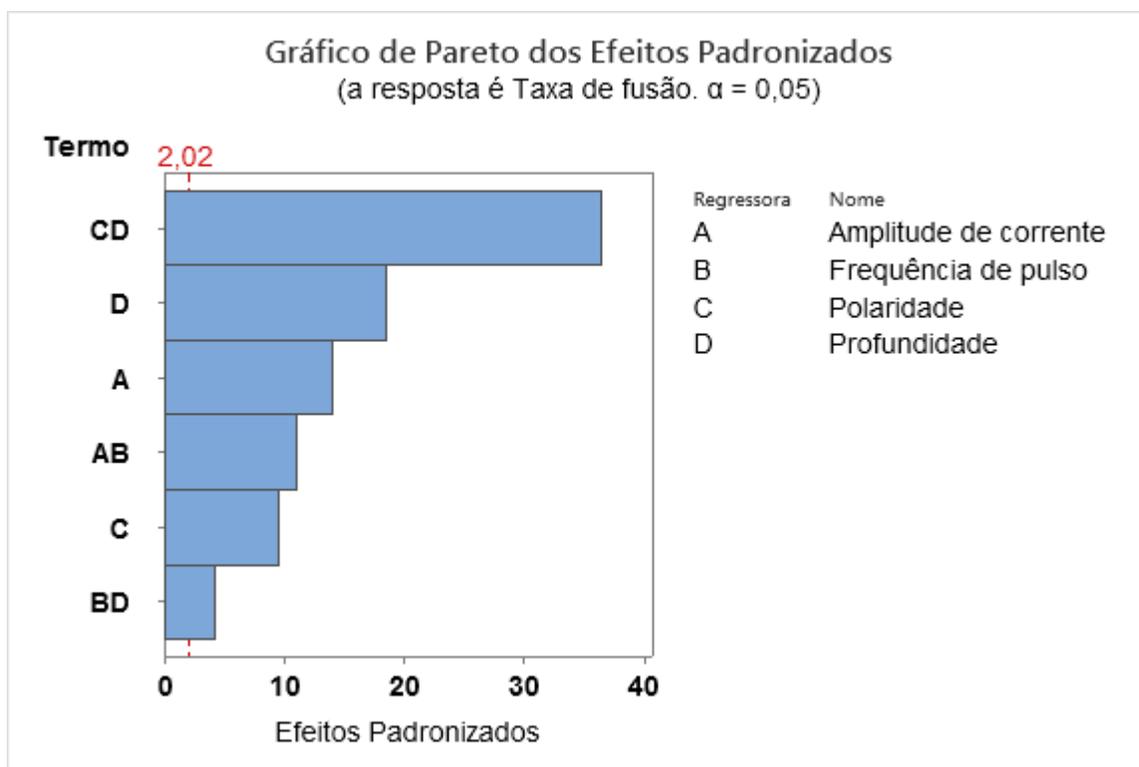


Evidencia-se que todas as regressoras possuem um Valor- $P \leq 0,05$. No entanto, analisando o novo Gráfico de Pareto, pode-se remover a regressora *frequência de pulso*profundidade* e executar uma nova análise de regressão.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)
Regressão	6	19,0732	98,47%	19,0732	3,17886
Amplitude de corrente	1	0,6840	3,53%	1,4257	1,42568
Polaridade	1	4,0426	20,87%	0,6652	0,66517

Profundidade	1	3,7688	19,46%	2,4838	2,48380
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	1	0,8652	4,47%	0,8737	0,87371
Frequência de pulso*Profundidade	1	0,1270	0,66%	0,1270	0,12704
Polaridade*Profundidade	1	9,5855	49,49%	9,5855	9,58547
Erro	41	0,2963	1,53%	0,2963	0,00723
Falta de ajuste	40	0,2961	1,53%	0,2961	0,00740
Erro puro	1	0,0002	0,00%	0,0002	0,00020
Total	47	19,3695	100,00%		
Fonte		Valor F	Valor-P		
Regressão		439,84	0,000		
Amplitude de corrente		197,26	0,000		
Polaridade		92,04	0,000		
Profundidade		343,67	0,000		
Amplitude de corrente*Frequência de pulso		120,89	0,000		
Frequência de pulso*Profundidade		17,58	0,000		
Polaridade*Profundidade		1326,28	0,000		
Erro					
Falta de ajuste		37,02	0,130		
Erro puro		*	*		
Total					



Observa-se na tabela de análise de variância que todas as regressoras têm um Valor-P $\leq 0,05$. Adicionalmente, na tabela de coeficiente pode-se ver que o VIF de todas as regressoras é inferior a 4. O VIF é uma medida estatística que permite avaliar a multicolinearidade das preditoras de uma regressão. A multicolinearidade ocorre quando existe uma alta correlação

entre variáveis independentes, podendo afetar a interpretação e precisão do modelo. Montgomery et al. (2012) estabelece que a experiência prática indica que se o valor VIF é maior do que 4, existe um indício de que os coeficientes da regressão estão mal estimados devido a multicolinearidade. Por conseguinte, para objeto do presente estudo, foi executada a eliminação de variáveis em função de um VIF superior a 4, sendo aceitado como um valor máximo. Além disso, o diagrama de Pareto sugere que todas as regressoras possuem um coeficiente representativo no impacto na resposta.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)
Regressão	5	18,9461	97,81%	18,9461	3,78923
Amplitude de corrente	1	0,6840	3,53%	1,3021	1,30211
Polaridade	1	4,0426	20,87%	0,6652	0,66517
Profundidade	1	3,7688	19,46%	3,7688	3,76880
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	1	0,8652	4,47%	0,8652	0,86525
Polaridade*Profundidade	1	9,5855	49,49%	9,5855	9,58547
Erro	42	0,4234	2,19%	0,4234	0,01008
Falta de ajuste	41	0,4232	2,18%	0,4232	0,01032
Erro puro	1	0,0002	0,00%	0,0002	0,00020
Total	47	19,3695	100,00%		

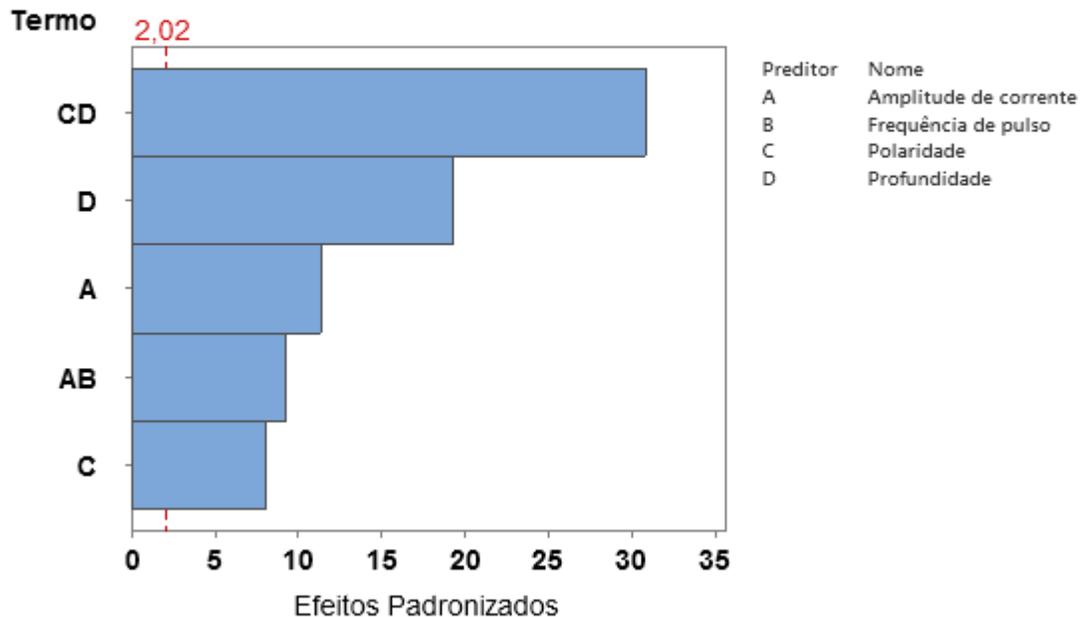
Fonte	Valor F	Valor-P
Regressão	375,92	0,000
Amplitude de corrente	129,18	0,000
Polaridade	65,99	0,000
Profundidade	373,89	0,000
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	85,84	0,000
Polaridade*Profundidade	950,94	0,000
Erro		
Falta de ajuste	51,60	0,110
Erro puro	*	*
Total		

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	IC de 95%
Constante	4,0657	0,0397	(3,9856. 4,1458)
Amplitude de corrente	0,006049	0,000532	(0,004975. 0,007123)
Polaridade	-0,1687	0,0208	(-0,2107. -0,1268)
Profundidade	-0,018933	0,000979	(-0,020909. -0,016957)
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	-0,000031	0,000003	(-0,000037. -0,000024)
Polaridade*Profundidade	0,030194	0,000979	(0,028218. 0,032170)

Termo	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	102,45	0,000	
Amplitude de corrente	11,37	0,000	1,21
Polaridade	-8,12	0,000	2,05
Profundidade	-19,34	0,000	1,00
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	-9,26	0,000	1,21
Polaridade*Profundidade	30,84	0,000	2,05

Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados
(a resposta é Taxa de fusão. $\alpha = 0,05$)



Nesse contexto, o modelo resultante desta etapa está representado pelas regressoras *Polaridade*profundidade*, *Profundidade*, *Amplitude de corrente*, *Amplitude de corrente*Frequência de pulso* e *Polaridade*.

3.) Validação do modelo

Segundo ZONATO et al. (2018), uma análise de regressão deve cumprir as seguintes hipóteses ou pressupostos:

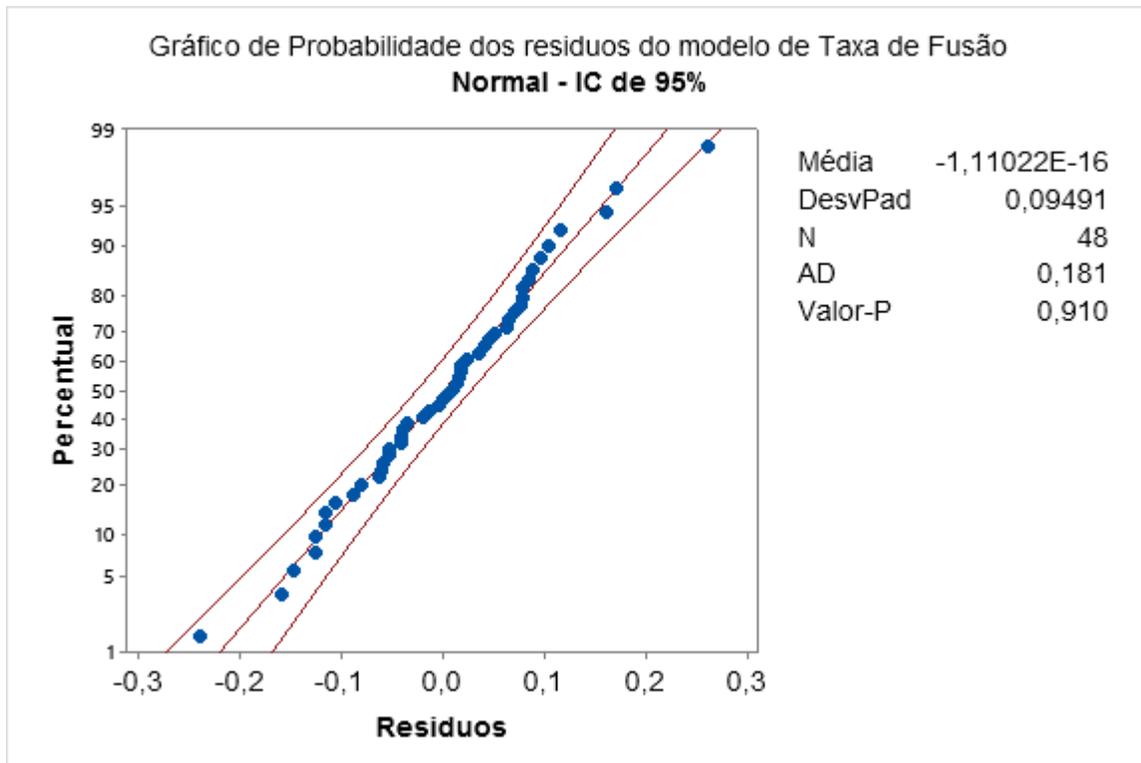
- Linearidade do Modelo*
- A distribuição condicional normal dos resíduos.
- Homogeneidade da variância da variável resposta dadas as variáveis independentes

*Dado que, a regressão linear é uma ferramenta que permite prever a variável resposta em função dos regressores, a hipótese da linearidade sempre será cumprida para todos os modelos.

Distribuição normal dos resíduos

O MINITAB permitiu realizar o teste de Anderson-Darling com a finalidade de avaliar a distribuição dos resíduos. Se o valor da estatística de teste for menor do que o valor crítico correspondente (0,05), pode-se rejeitar a hipótese nula de que os dados seguem uma distribuição normal. Caso contrário, com um valor superior ao estipulado como limite de

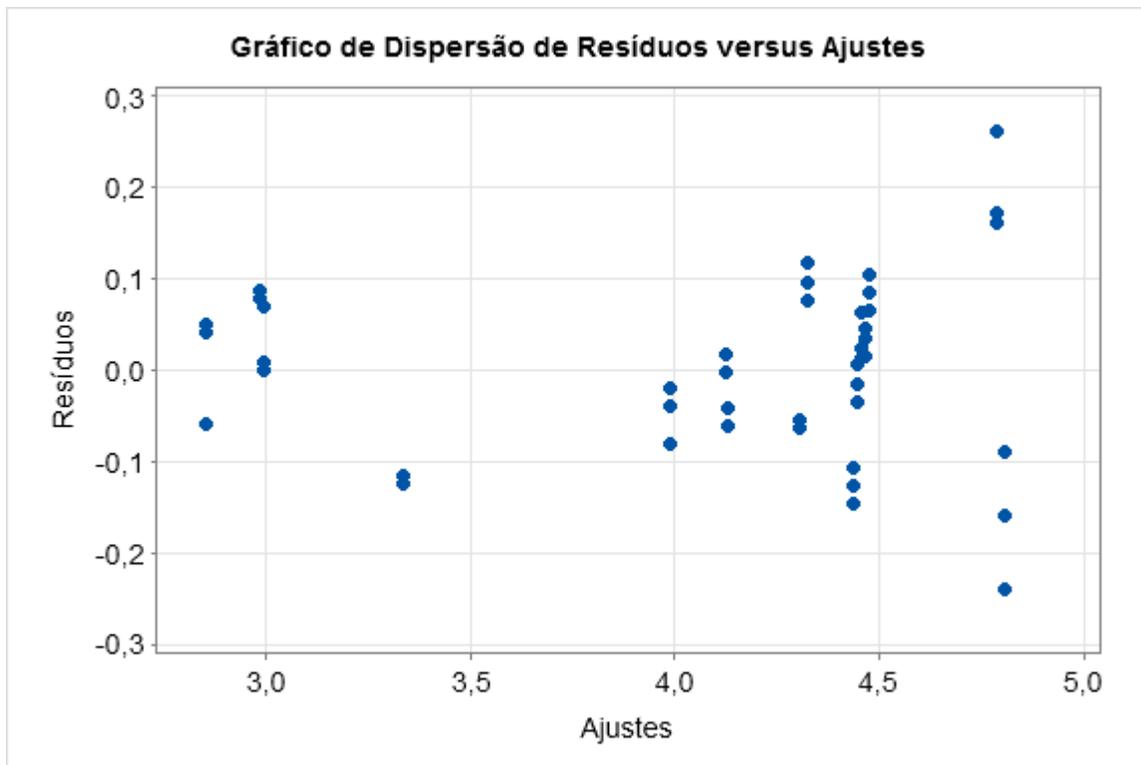
confiança, pode-se considerar que a amostra é normalmente distribuída. Como pode ser visto no gráfico de probabilidade do modelo de Taxa de Fusão, os resíduos cumprem a hipótese da distribuição normal, já que o Valor-P = 0,910.



Homocedasticidade

Tal como sugerem ZONATO et al. (2018), a homocedasticidade pode ser avaliada a través do gráfico de dispersão dos resíduos vs ajustes.

Tal como se evidencia no gráfico de resíduos vs ajustes, o espalhamento dos pontos não exhibe uma tendência clara. Consequentemente, o modelo cumpre com o pressuposto da homocedasticidade, uma vez que a variabilidade dos resíduos se mantém consistente em toda a faixa dos valores ajustados.



4.) Modelo final

Após a execução das etapas propostas, o modelo final que permite descrever o comportamento da taxa de fusão é o seguinte:

Equação de Regressão

$$T_f = 4,0657 + 0,006049 \text{ Amplitude de corrente} - 0,1687 \text{ Polaridade} - 0,018933 \text{ Profundidade} \\ - 0,000031 \text{ Amplitude de corrente} * \text{Frequência de pulso} \\ + 0,030194 \text{ Polaridade} * \text{Profundidade}$$

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
0,100399	97,81%	97,55%	0,566064	97,08%	-74,06	-63,76

APÊNDICE B – Modelo final da tensão do arco

1.) Definição do modelo inicial

As regressoras iniciais do modelo para a tensão do arco, são as seguintes:

Variável resposta	Regressoras do modelo inicial na RLM
Tensão do arco	A + B + C + D + AB + AC + AD + BC + BD + CD + taxa de fusão

Onde A = Amplitude de pulso, B = frequência de pulso, C = polaridade, D = profundidade, e AB, AC, AD, BC, BD e CD são as suas interações.

2.) Eliminação de regressoras

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)
Regressão	11	363,787	94,99%	363,787	33,0715
Amplitude de corrente	1	0,131	0,03%	0,081	0,0813
Frequência de pulso	1	0,017	0,00%	4,914	4,9138
Polaridade	1	106,118	27,71%	0,431	0,4310
Profundidade	1	197,925	51,68%	0,934	0,9339
Taxa de fusão	1	48,360	12,63%	1,542	1,5423
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	1	1,504	0,39%	0,437	0,4373
Amplitude de corrente*Polaridade	1	5,873	1,53%	6,009	6,0090
Amplitude de corrente*Profundidade	1	0,758	0,20%	0,247	0,2466
Frequência de pulso*Polaridade	1	1,506	0,39%	1,634	1,6344
Frequência de pulso*Profundidade	1	1,471	0,38%	1,276	1,2757
Polaridade*Profundidade	1	0,124	0,03%	0,124	0,1243
Erro	36	19,184	5,01%	19,184	0,5329
Falta de ajuste	31	18,234	4,76%	18,234	0,5882
Erro puro	5	0,950	0,25%	0,950	0,1901
Total	47	382,971	100,00%		

Fonte	Valor F	Valor-P
Regressão	62,06	0,000
Amplitude de corrente	0,15	0,698
Frequência de pulso	9,22	0,004
Polaridade	0,81	0,374
Profundidade	1,75	0,194
Taxa de fusão	2,89	0,098
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	0,82	0,371
Amplitude de corrente*Polaridade	11,28	0,002
Amplitude de corrente*Profundidade	0,46	0,501
Frequência de pulso*Polaridade	3,07	0,088
Frequência de pulso*Profundidade	2,39	0,131
Polaridade*Profundidade	0,23	0,632

Erro

Falta de ajuste	3,09	0,105
Erro puro	*	*
Total		

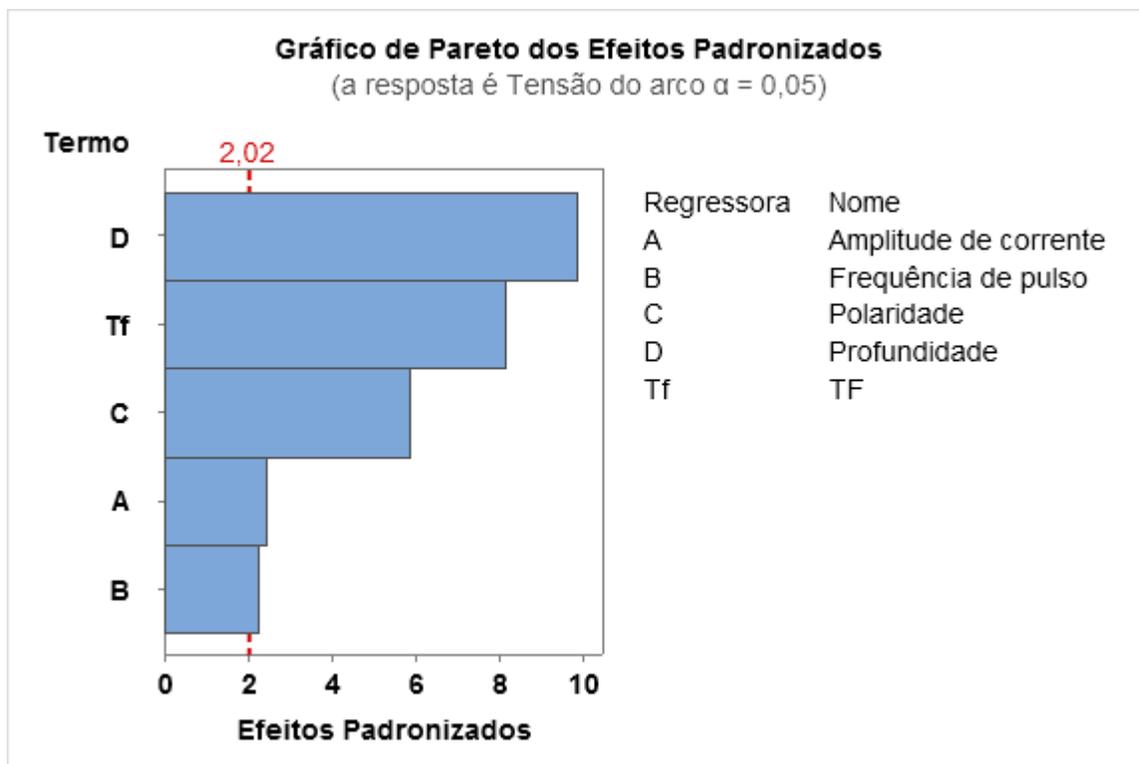
Como pode ser visto, somente a *frequência de pulso* e a interação entre a *amplitude de corrente x polaridade* são as regressoras com um Valor-P $\leq 0,05$, sendo $R^2=28,10\%$. Neste caso, é provável que um melhor modelo seja construído, eliminando todas as interações dos parâmetros principais e sendo submetido esse modelo a uma nova análise de variância. Cabe destacar que uma metodologia similar também foi empregada por Fydrych et al. (2015). Os autores primeiramente utilizaram *corrente, polaridade e salinidade da água*, bem como suas interações de primeira ordem, para construir o Modelo I, com o objetivo de explicar o teor de hidrogênio difusível em soldagem molhada na profundidade de 200 mm. Contudo, após análise quantitativa com o auxílio do diagrama de Pareto, verificaram que nenhuma preditora ou interação era significativa, sendo necessário sugerir um novo modelo (Modelo II) baseado apenas nas variáveis explicativas, excluindo suas interações.

Variável resposta	Regressoras do novo modelo para ser avaliada a análise de regressão
Tensão do arco	A + B + C + D + taxa de fusão

Após validar a análise de variância, pode se demonstrar que todas as regressoras do novo modelo apresentam um Valor-P $\leq 0,05$. No entanto, o gráfico de Pareto demonstra que podem se remover a *amplitude de corrente* e a *frequência de pulso* em função de uma magnitude cuja mudança provavelmente gere um menor impacto na resposta.

Análise de Variância

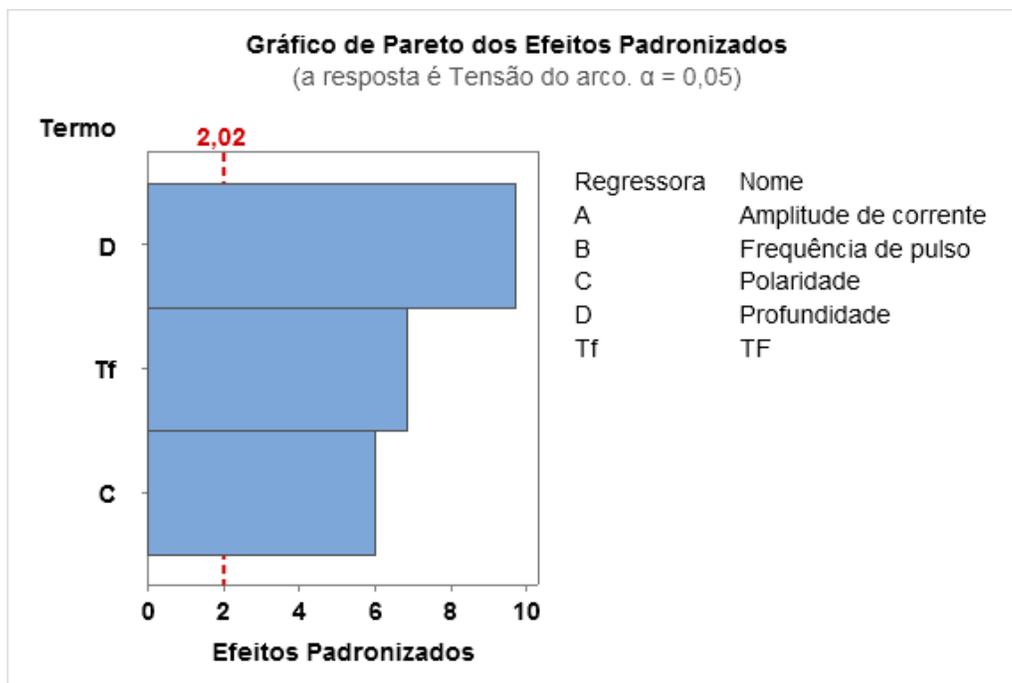
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	5	352,551	92,06%	352,551	70,5102	97,35	0,000
Amplitude de corrente	1	0,131	0,03%	4,403	4,4029	6,08	0,018
Frequência de pulso	1	0,017	0,00%	3,698	3,6980	5,11	0,029
Polaridade	1	106,118	27,71%	24,992	24,9923	34,51	0,000
Profundidade	1	197,925	51,68%	70,462	70,4623	97,29	0,000
Taxa de fusão	1	48,360	12,63%	48,360	48,3601	66,77	0,000
Erro	42	30,420	7,94%	30,420	0,7243		
Falta de ajuste	37	29,469	7,69%	29,469	0,7965	4,19	0,057
Erro puro	5	0,950	0,25%	0,950	0,1901	*	*
Total	47	382,971	100,00%				



Após a eliminação das regressoras por impacto, e a execução de uma nova análise de regressão, pode-se proceder à validação do modelo. Adicionalmente, na tabela de coeficiente pode-se ver que o VIF de todas as regressoras é inferior a 4.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	3	344,943	90,07%	344,943	114,981	133,04	0,000
Polaridade	1	106,118	27,71%	31,487	31,487	36,43	0,000
Profundidade	1	197,925	51,68%	81,826	81,826	94,68	0,000
Taxa de fusão	1	40,899	10,68%	40,899	40,899	47,32	0,000
Erro	44	38,028	9,93%	38,028	0,864		
Falta de ajuste	39	37,078	9,68%	37,078	0,951	5,00	0,039
Erro puro	5	0,950	0,25%	0,950	0,190	*	*
Total	47	382,971	100,00%				



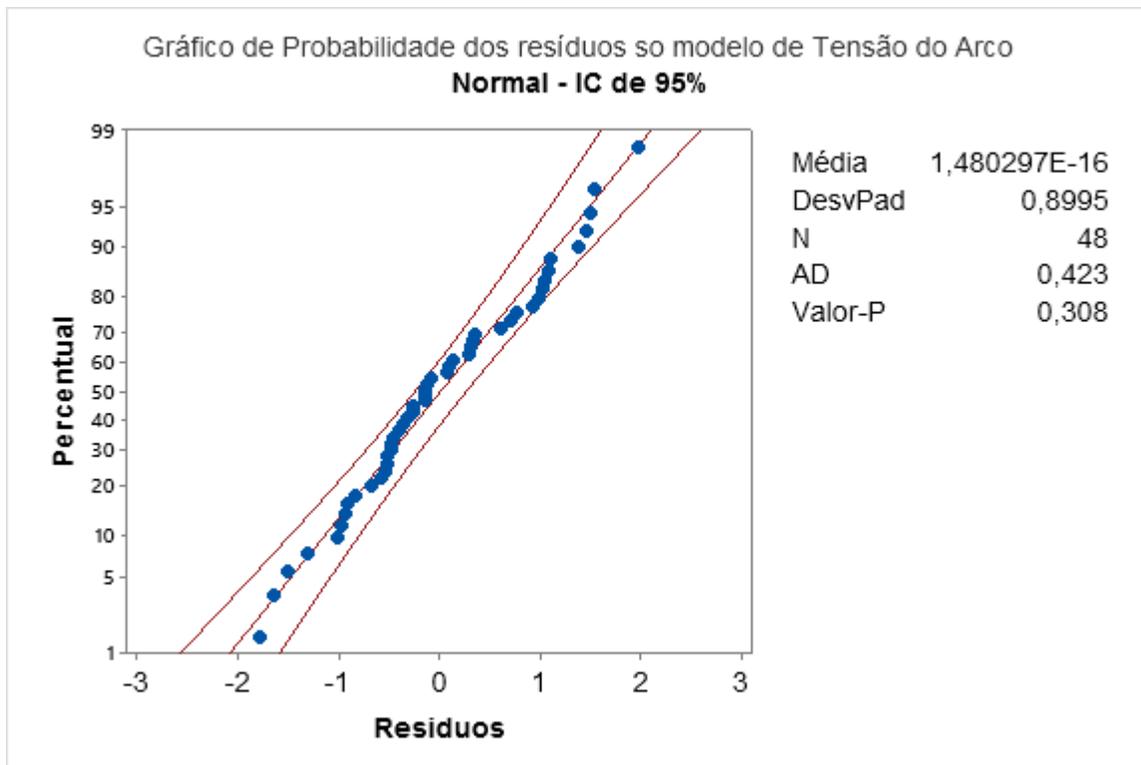
Coeficientes

Termo	Coef	EP de Coef	IC de 95%	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	17,39	1,20	(14,96. 19,81)	14,45	0,000	
Polaridade	0,941	0,156	(0,627. 1,255)	6,04	0,000	1,35
Profundidade	-0,1016	0,0104	(-0,1226. - 0,0805)	-9,73	0,000	1,33
Tf	1,881	0,273	(1,330. 2,432)	6,88	0,000	1,68

3.) Validação do modelo

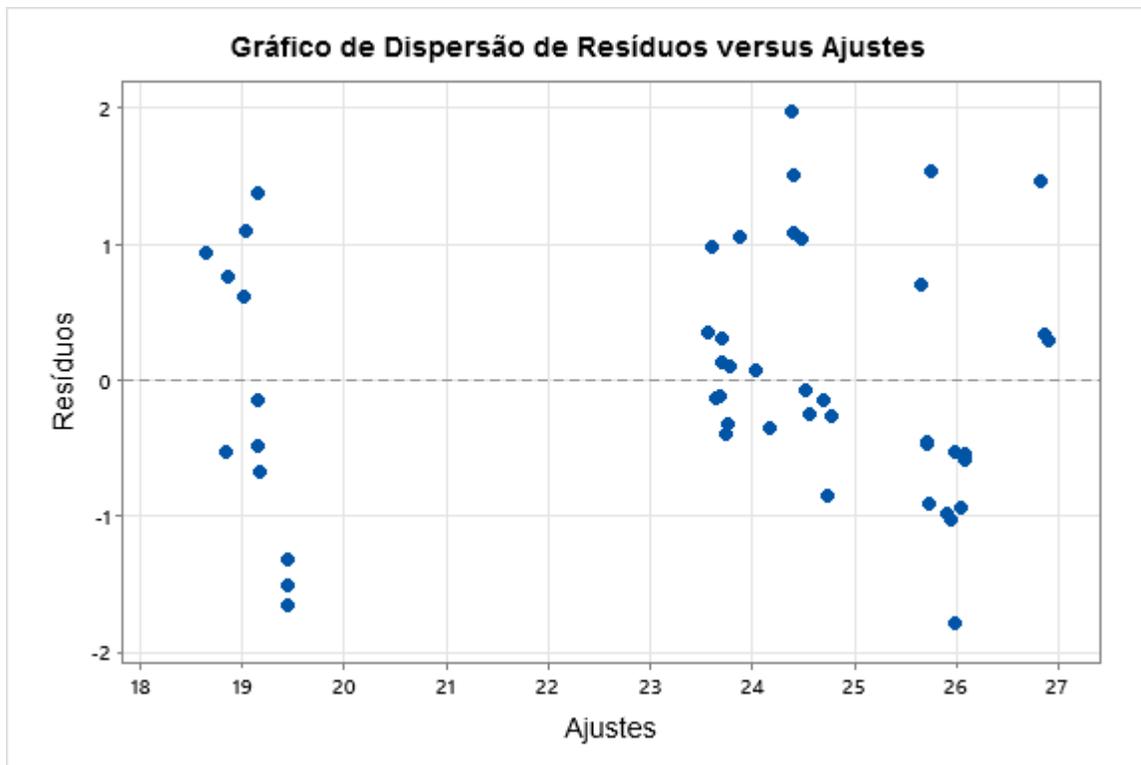
Distribuição normal dos resíduos

Como pode ser visto no gráfico de probabilidade do modelo da tensão do arco, os resíduos cumprem a hipótese da distribuição normal, já que o Valor-P = 0,308.



Homocedasticidade

Tal como se evidencia no gráfico de resíduos vs ajustes, o espalhamento dos pontos não exibe uma tendência clara. Consequentemente, o modelo cumpre com o pressuposto da homocedasticidade, uma vez que a variabilidade dos resíduos se mantém consistente em toda a faixa dos valores ajustados.



4.) Modelo final

Após a execução das etapas propostas, o modelo final que permite descrever o comportamento da tensão do arco é o seguinte:

Equação de Regressão

$$U = 17,39 + 0,941 \text{ Polaridade} - 0,1016 \text{ Profundidade} + 1,881 \text{ TF}$$

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
0,929667	90,07%	89,39%	45,0565	88,24%	136,47	144,40

APÊNDICE C – Modelo final do desvio padrão da tensão do arco

1.) Definição do modelo inicial

As regressoras iniciais do modelo para DPU são as seguintes:

Variável resposta	Regressoras do modelo inicial na RLM
DPU	A+ B + C + D + AB+ AC + AD + BC + BD + CD + tensão do arco

Onde A = Amplitude de pulso, B = frequência de pulso, C = polaridade, D = profundidade, e AB, AC, AD, BC, BD e CD são as suas interações.

2.) Eliminação de regressoras

Como pode ser visto, a *frequência de pulso*, *Um*, *Amplitude de corrente*polaridade*, *frequência de pulso*polaridade*, *polaridade*profundidade*, apresentam um Valor-P > 0,05. Por conseguinte, serão removidas e será executada uma nova análise de regressão com as regressoras remanescentes.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)
Regressão	12	53,5586	96,11%	53,5586	4,46322
Amplitude de corrente	1	15,7209	28,21%	3,8354	3,83536
Frequência de pulso	1	12,7411	22,86%	0,0670	0,06696
Polaridade	1	4,4591	8,00%	0,5800	0,58000
Profundidade	1	8,3918	15,06%	0,2779	0,27787
U	1	1,5772	2,83%	0,0899	0,08992
ICC	1	6,5348	11,73%	1,0068	1,00682
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	1	1,3979	2,51%	1,4969	1,49692
Amplitude de corrente*Polaridade	1	0,0017	0,00%	0,0117	0,01170
Amplitude de corrente*Profundidade	1	0,8992	1,61%	0,4769	0,47688
Frequência de pulso*Polaridade	1	0,0368	0,07%	0,0159	0,01585
Frequência de pulso*Profundidade	1	1,7326	3,11%	1,7978	1,79782
Polaridade*Profundidade	1	0,0657	0,12%	0,0657	0,06566
Erro	35	2,1683	3,89%	2,1683	0,06195
Total	47	55,7270	100,00%		
Fonte	Valor F	Valor-P			
Regressão	72,04	0,000			
Amplitude de corrente	61,91	0,000			
Frequência de pulso	1,08	0,306			
Polaridade	9,36	0,004			
Profundidade	4,49	0,041			
U	1,45	0,236			
Icc	16,25	0,000			
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	24,16	0,000			
Amplitude de corrente*Polaridade	0,19	0,667			

Amplitude de corrente*Profundidade	7,70	0,009
Frequência de pulso*Polaridade	0,26	0,616
Frequência de pulso*Profundidade	29,02	0,000
Polaridade*Profundidade	1,06	0,310
Erro		
Total		

Como pode ser visto, a *profundidade* apresenta um Valor-P > 0,05. Por conseguinte, será removida e será executada uma nova análise de regressão com as regressoras remanescentes.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)
Regressão	7	52,472	94,16%	52,4725	7,49607
Amplitude de corrente	1	15,721	28,21%	7,7666	7,76661
Polaridade	1	4,459	8,00%	1,0088	1,00884
Profundidade	1	8,392	15,06%	0,1994	0,19944
Icc	1	14,743	26,46%	2,9224	2,92236
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	1	6,099	10,95%	6,7807	6,78071
Amplitude de corrente*Profundidade	1	1,105	1,98%	0,8089	0,80891
Frequência de pulso*Profundidade	1	1,954	3,51%	1,9536	1,95357
Erro	40	3,254	5,84%	3,2545	0,08136
Total	47	55,727	100,00%		

Fonte	Valor F	Valor-P
Regressão	92,13	0,000
Amplitude de corrente	95,46	0,000
Polaridade	12,40	0,001
Profundidade	2,45	0,125
Icc	35,92	0,000
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	83,34	0,000
Amplitude de corrente*Profundidade	9,94	0,003
Frequência de pulso*Profundidade	24,01	0,000
Erro		
Total		

Como pode ser visto, todas variáveis encontram-se dentro do nível de confiança. No entanto, o I_{cc} deve ser eliminado porque apresenta um valor de VIF >4, o que denota redundância com outra variável do modelo. Uma nova análise de regressão será executada.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)
Regressão	6	52,2730	93,80%	52,2730	8,71217
Amplitude de corrente	1	15,7209	28,21%	8,1386	8,13855
Polaridade	1	4,4591	8,00%	0,9840	0,98402
Icc	1	22,5886	40,53%	3,0232	3,02317
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	1	6,5715	11,79%	7,4285	7,42852
Amplitude de corrente*Profundidade	1	0,1722	0,31%	0,7765	0,77653

Frequência de pulso*Profundidade	1	2,7608	4,95%	2,7608	2,76083
Erro	41	3,4539	6,20%	3,4539	0,08424
Total	47	55,7270	100,00%		

Fonte	Valor F	Valor-P
Regressão	103,42	0,000
Amplitude de corrente	96,61	0,000
Polaridade	11,68	0,001
Icc	35,89	0,000
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	88,18	0,000
Amplitude de corrente*Profundidade	9,22	0,004
Frequência de pulso*Profundidade	32,77	0,000
Erro		
Total		

Coeficientes

Termo	Coef	EP de Coef	IC de 95%
Constante	2,108	0,117	(1,872. 2,345)
Amplitude de corrente	0,02363	0,00240	(0,01878. 0,02849)
Polaridade	-0,1641	0,0480	(-0,2611. -0,0671)
Icc	0,2733	0,0456	(0,1812. 0,3655)
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	-0,000144	0,000015	(-0,000176. -0,000113)
Amplitude de corrente*Profundidade	-0,000189	0,000062	(-0,000315. -0,000063)
Frequência de pulso*Profundidade	0,000259	0,000045	(0,000168. 0,000350)

Termo	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	18,00	0,000	
Amplitude de corrente	9,83	0,000	2,96
Polaridade	-3,42	0,001	1,31
Icc	5,99	0,000	4,64
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	-9,39	0,000	3,14
Amplitude de corrente*Profundidade	-3,04	0,004	3,26
Frequência de pulso*Profundidade	5,72	0,000	2,90

Como pode ser visto, a *Amplitude de corrente*profundidade* apresenta um Valor-P > 0,05. Por conseguinte, será removida e será executada uma nova análise de regressão com as regressoras remanescentes.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)
Regressão	5	49,250	88,38%	49,2499	9,8500
Amplitude de corrente	1	15,721	28,21%	23,1132	23,1132
Polaridade	1	4,459	8,00%	4,4591	4,4591
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	1	16,542	29,68%	22,3724	22,3724

Amplitude de corrente*Profundidade	1	6,327	11,35%	0,0277	0,0277
Frequência de pulso*Profundidade	1	6,201	11,13%	6,2008	6,2008
Erro	42	6,477	11,62%	6,4771	0,1542
Total	47	55,727	100,00%		
Fonte		Valor F	Valor-P		
Regressão		63,87	0,000		
Amplitude de corrente		149,87	0,000		
Polaridade		28,91	0,000		
Amplitude de corrente*Frequência de pulso		145,07	0,000		
Amplitude de corrente*Profundidade		0,18	0,674		
Frequência de pulso*Profundidade		40,21	0,000		
Erro					
Total					

Após a etapa de eliminação, pode se proceder à validação do modelo. Adicionalmente, na tabela de coeficiente pode-se ver que o VIF de todas as regressoras é inferior a 4.

Análise de Variância

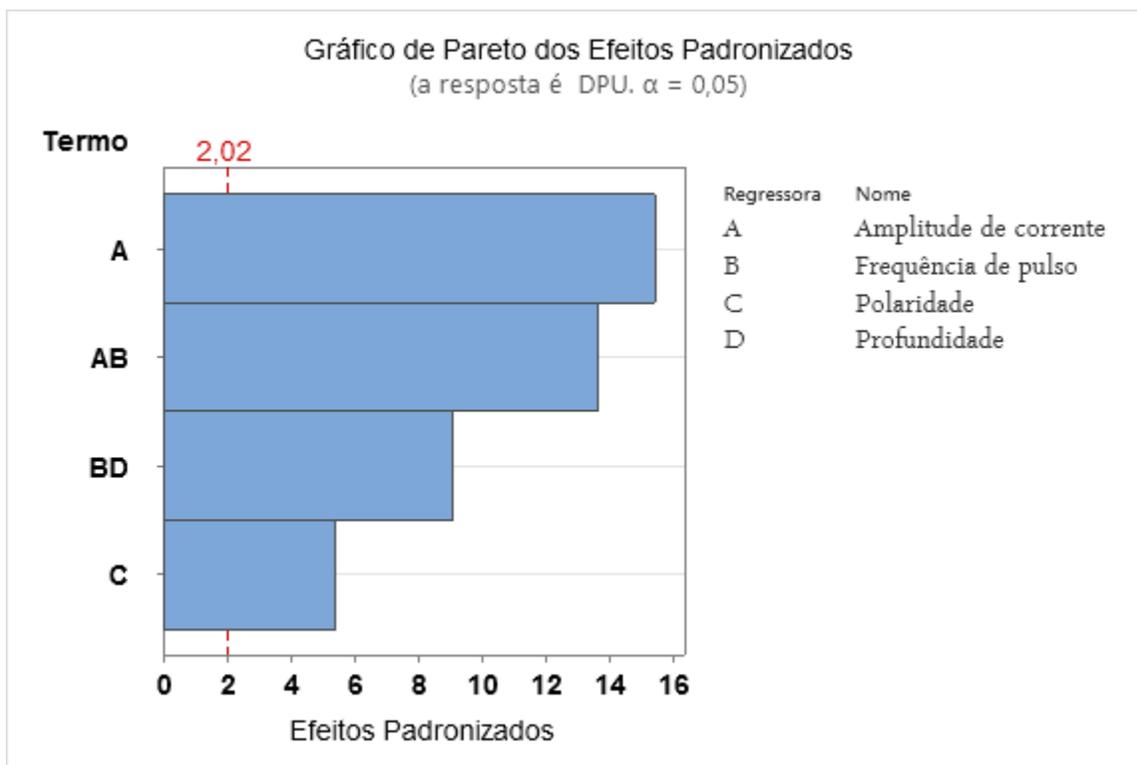
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)
Regressão	4	49,222	88,33%	49,222	12,3055
Amplitude de corrente	1	15,721	28,21%	36,024	36,0238
Polaridade	1	4,459	8,00%	4,459	4,4591
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	1	16,542	29,68%	28,101	28,1012
Frequência de pulso*Profundidade	1	12,500	22,43%	12,500	12,5001
Erro	43	6,505	11,67%	6,505	0,1513
Total	47	55,727	100,00%		
Fonte		Valor F	Valor-P		
Regressão		81,35	0,000		
Amplitude de corrente		238,13	0,000		
Polaridade		29,48	0,000		
Amplitude de corrente*Frequência de pulso		185,76	0,000		
Frequência de pulso*Profundidade		82,63	0,000		
Erro					
Total					

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	IC de 95%
Constante	2,233	0,149	(1,933. 2,533)
Amplitude de corrente	0,03278	0,00212	(0,02850. 0,03707)
Polaridade	-0,3048	0,0561	(-0,4180. -0,1916)
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	-0,000203	0,000015	(-0,000233. -0,000173)
Frequência de pulso*Profundidade	0,000376	0,000041	(0,000293. 0,000460)
Termo	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	15,02	0,000	
Amplitude de corrente	15,43	0,000	1,29
Polaridade	-5,43	0,000	1,00
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	-13,63	0,000	1,64

Frequência de pulso*Profundidade

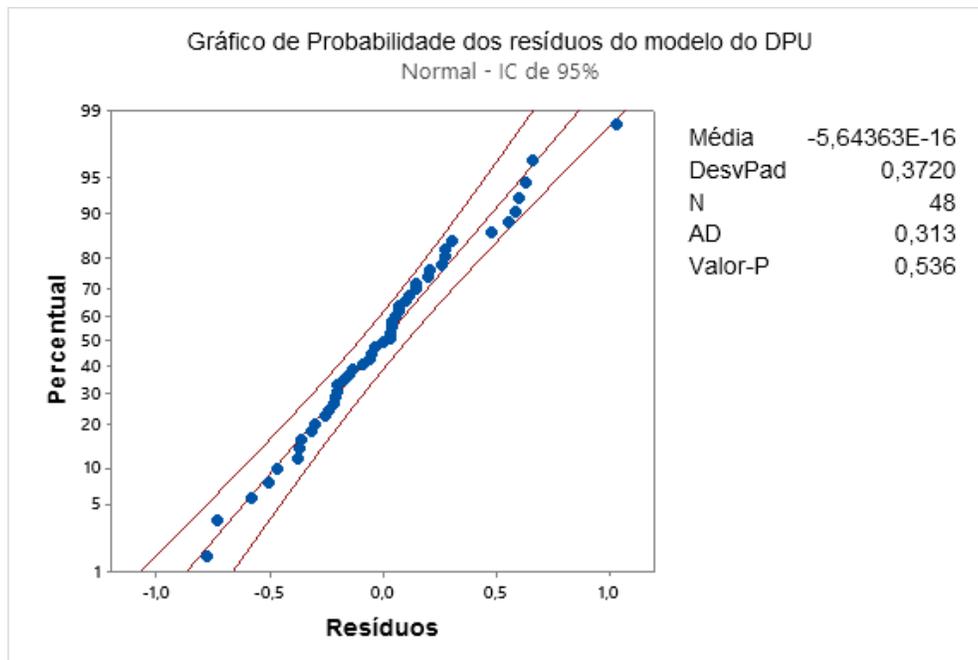
9,09 0,000 1,35



3.) Validação do modelo

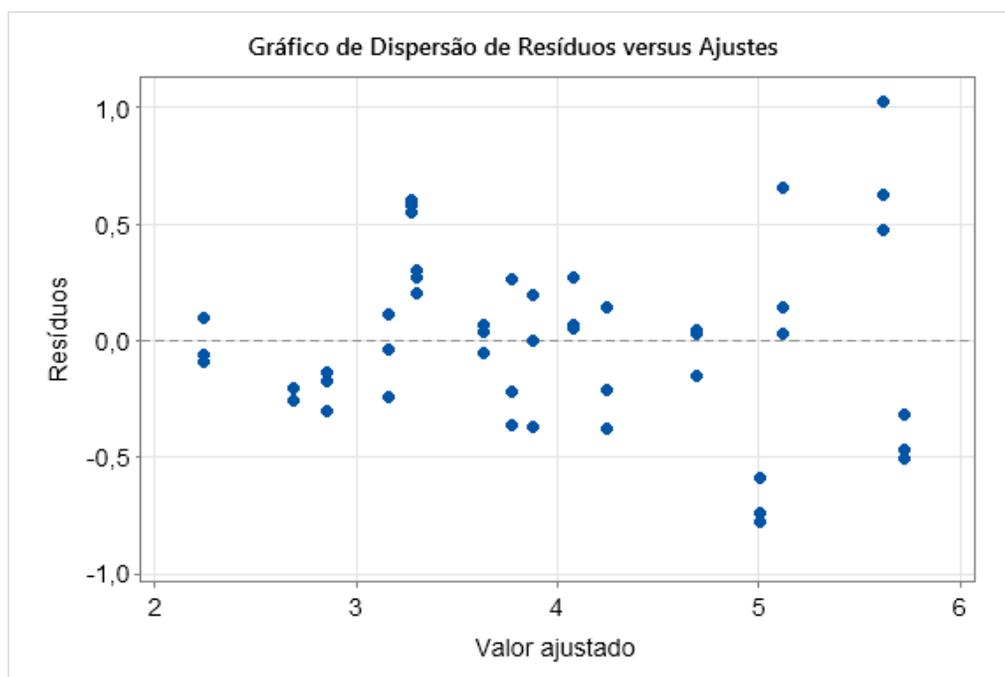
Distribuição normal dos resíduos

Como pode ser visto no gráfico de probabilidade do modelo do DPU, os resíduos cumprem a hipótese da distribuição normal, já que o Valor-P = 0,536.



Homocedasticidade

Tal como se evidencia no gráfico de resíduos vs ajustes, o espalhamento dos pontos não exibe uma tendência clara. Consequentemente, o modelo cumpre com o pressuposto da homocedasticidade, uma vez que a variabilidade dos resíduos se mantém consistente em toda a faixa dos valores ajustados.



4.) Modelo final

Após a execução das etapas propostas, o modelo final que permite descrever o comportamento do DPU é o seguinte:

Equação de Regressão

$$\begin{aligned} \text{DPU} = & 2,233 + 0,03278 \text{ Amplitude de corrente} \\ & - 0,3048 \text{ Polaridade} \\ & - 0,000203 \text{ Amplitude de corrente} * \text{Frequência de pulso} \\ & + 0,000376 \text{ Frequência de pulso} * \text{Profundidade} \end{aligned}$$

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
0,388941	88,33%	87,24%	7,96988	85,70%	54,33	63,51

APÊNDICE D – Modelo final da penetração máxima do cordão de solda.

1.) Definição do modelo inicial

As regressoras iniciais do modelo para penetração máxima do cordão de solda são as seguintes:

Variável resposta	Regressoras do modelo inicial na RLM
DPU	A+B + C + D + AB+ AC + AD + BC + BD + CD + taxa de fusão + DPU + I _{cc}

Onde A = Amplitude de pulso, B = frequência de pulso, C = polaridade, D = profundidade, e AB, AC, AD, BC, BD e CD são as suas interações.

2.) Eliminação de regressoras

Como pode ser visto, a *frequência de pulso*, *Um*, *Amplitude de corrente*polaridade*, *frequência de pulso*polaridade*, *polaridade*profundidade*, apresentam um Valor-P > 0,05. Por conseguinte, serão removidas e será executada uma nova análise de regressão com as regressoras remanescentes.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)
Regressão	13	14,0311	90,87%	14,0311	1,07931
Amplitude de corrente	1	0,2296	1,49%	0,2570	0,25695
Frequência de pulso	1	0,1728	1,12%	1,6895	1,68952
Polaridade	1	0,2852	1,85%	0,2218	0,22185
Profundidade	1	2,7361	17,72%	0,2950	0,29498
Tf	1	5,1825	33,57%	0,4460	0,44603
DPU	1	0,0828	0,54%	0,4361	0,43612
Icc	1	0,5294	3,43%	0,0454	0,04542
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	1	3,5418	22,94%	1,0839	1,08395
Amplitude de corrente*Polaridade	1	0,0999	0,65%	0,0268	0,02677
Amplitude de corrente*Profundidade	1	0,1715	1,11%	0,0489	0,04894
Frequência de pulso*Polaridade	1	0,0195	0,13%	0,2503	0,25034
Frequência de pulso*Profundidade	1	0,1962	1,27%	0,0084	0,00841
Polaridade*Profundidade	1	0,7837	5,08%	0,7837	0,78374
Erro	34	1,4091	9,13%	1,4091	0,04144
Total	47	15,4401	100,00%		
Fonte	Valor F	Valor-P			
Regressão	26,04	0,000			
Amplitude de corrente	6,20	0,018			
Frequência de pulso	40,77	0,000			
Polaridade	5,35	0,027			
Profundidade	7,12	0,012			
Tf	10,76	0,002			

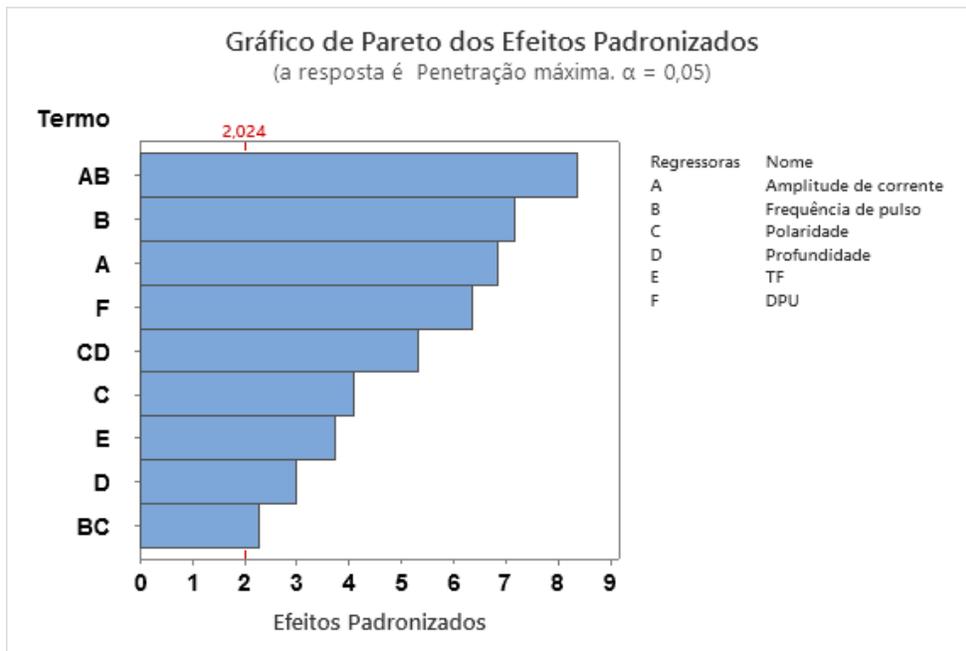
DPU	10,52	0,003
Icc	1,10	0,303
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	26,16	0,000
Amplitude de corrente*Polaridade	0,65	0,427
Amplitude de corrente*Profundidade	1,18	0,285
Frequência de pulso*Polaridade	6,04	0,019
Frequência de pulso*Profundidade	0,20	0,655
Polaridade*Profundidade	18,91	0,000
Erro		
Total		

Como pode ser visto, todas variáveis encontram-se dentro do nível de confiança. No entanto, pode-se eliminar *frequência de pulso*polaridade*, em função do impacto.

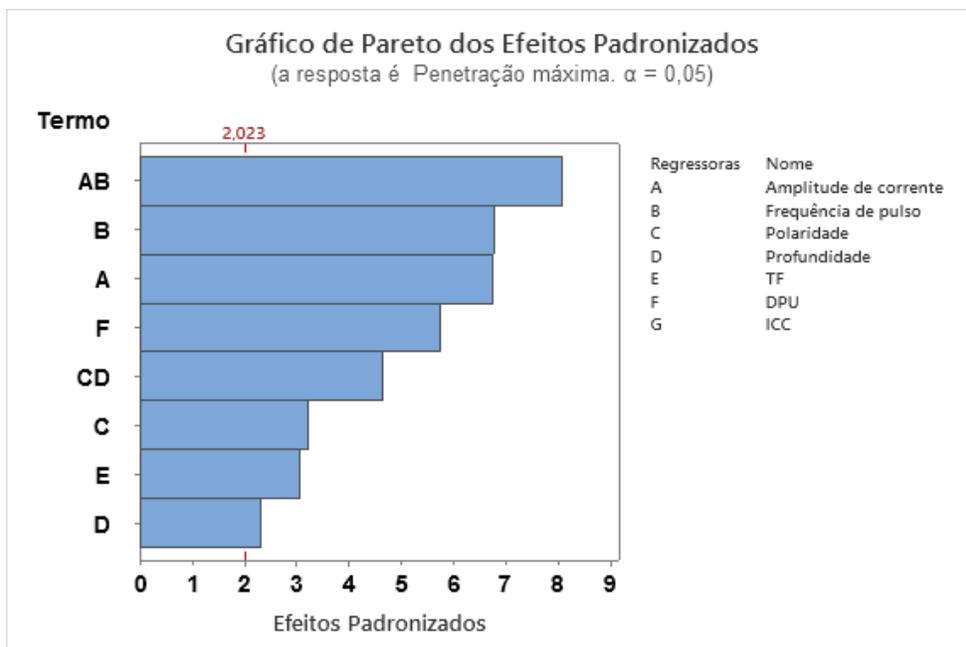
Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)
Regressão	9	13,8583	89,76%	13,8583	1,53981
Amplitude de corrente	1	0,2296	1,49%	1,9621	1,96206
Frequência de pulso	1	0,1728	1,12%	2,1513	2,15133
Polaridade	1	0,2852	1,85%	0,6989	0,69893
Profundidade	1	2,7361	17,72%	0,3699	0,36991
TF	1	5,1825	33,57%	0,5865	0,58652
DPU	1	0,0828	0,54%	1,6911	1,69113
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	1	3,9606	25,65%	2,9137	2,91374
Frequência de pulso*Polaridade	1	0,0231	0,15%	0,2180	0,21799
Polaridade*Profundidade	1	1,1856	7,68%	1,1856	1,18560
Erro	38	1,5818	10,24%	1,5818	0,04163
Total	47	15,4401	100,00%		

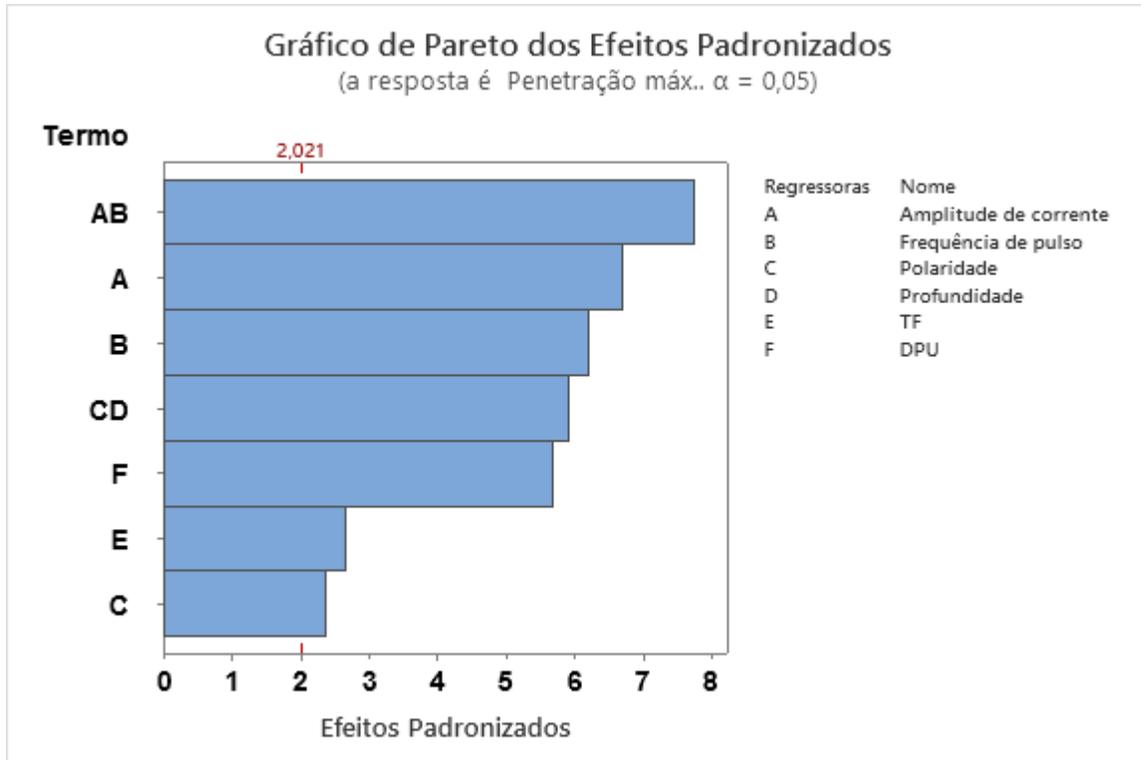
Fonte	Valor F	Valor-P
Regressão	36,99	0,000
Amplitude de corrente	47,14	0,000
Frequência de pulso	51,68	0,000
Polaridade	16,79	0,000
Profundidade	8,89	0,005
TF	14,09	0,001
DPU	40,63	0,000
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	70,00	0,000
Frequência de pulso*Polaridade	5,24	0,028
Polaridade*Profundidade	28,48	0,000
Erro		
Total		



Como pode ser visto, todas variáveis encontram-se dentro do nível de confiança. No entanto, pode-se eliminar *profundidade*, em função do impacto.



Como pode ser visto, todas variáveis encontram-se dentro do nível de confiança. No entanto, pode-se eliminar *polaridade* e *taxa de fusão*, em função do impacto.



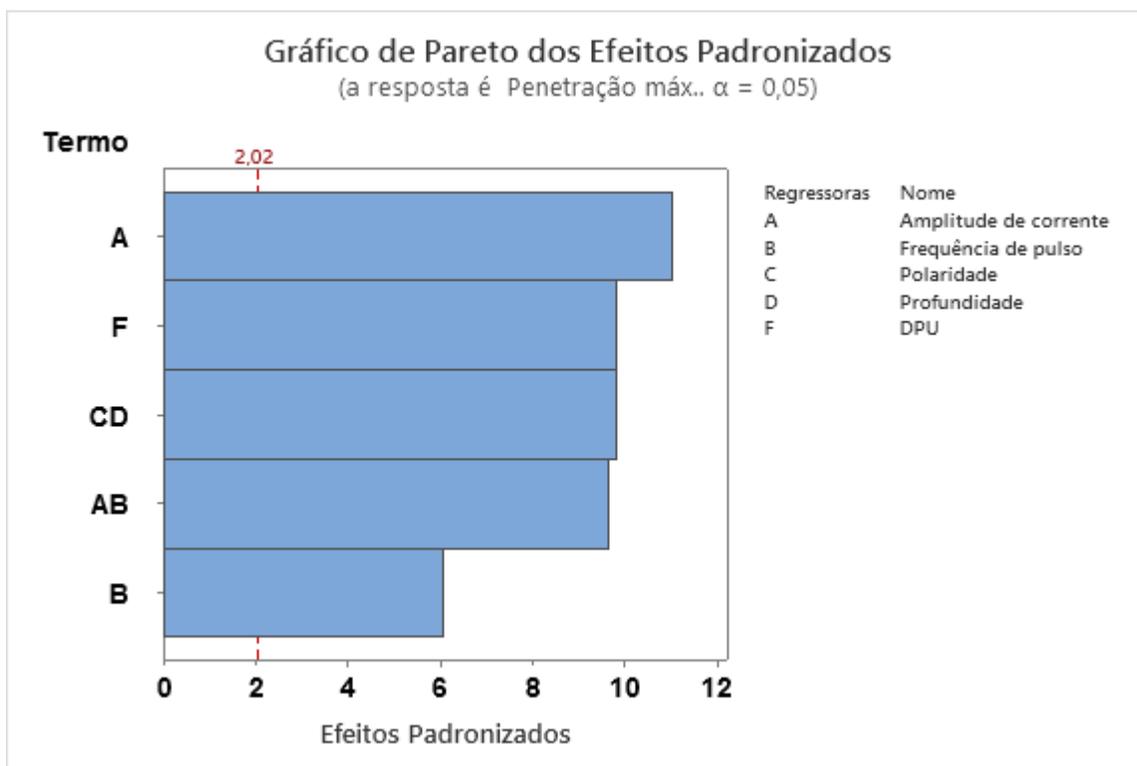
Como pode ser visto, todas variáveis encontram-se dentro do nível de confiança. No entanto, evidencia-se que *frequência de pulso*, *Amplitude de Corrente* e *Amplitude de Corrente*Frequência de pulso* têm um VIF > 4. Nesse sentido, as três regressoras estão oferecendo informações semelhantes que afetam a precisão do modelo. Por tanto, será eliminada uma delas para ver o comportamento do VIF do novo modelo (será removida a *frequência de pulso*)

Coeficientes

Termo	Coef	EP de Coef	IC de 95%
Constante	2,413	0,184	(2,042. 2,784)

Amplitude de corrente	0,02606	0,00236	(0,02130. 0,03082)
Frequência de pulso	0,00936	0,00155	(0,00623. 0,01248)
DPU	-0,4953	0,0504	(-0,5970. -0,3936)
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	-0,000212	0,000022	(-0,000256. -0,000168)
Polaridade*Profundidade	-0,01623	0,00165	(-0,01957. -0,01289)

Termo	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	13,14	0,000	
Amplitude de corrente	11,05	0,000	4,11
Frequência de pulso	6,05	0,000	6,50
DPU	-9,83	0,000	2,42
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	-9,67	0,000	9,18
Polaridade*Profundidade	-9,81	0,000	1,01



Após a etapa de eliminação, pode se proceder à validação do modelo. Adicionalmente, na tabela de coeficiente pode-se ver que o VIF de todas as regressoras é inferior a 4.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)
Regressão	4	10,8450	70,24%	10,845	2,7112
Amplitude de corrente	1	0,2296	1,49%	5,025	5,0246
DPU	1	0,8250	5,34%	5,086	5,0861

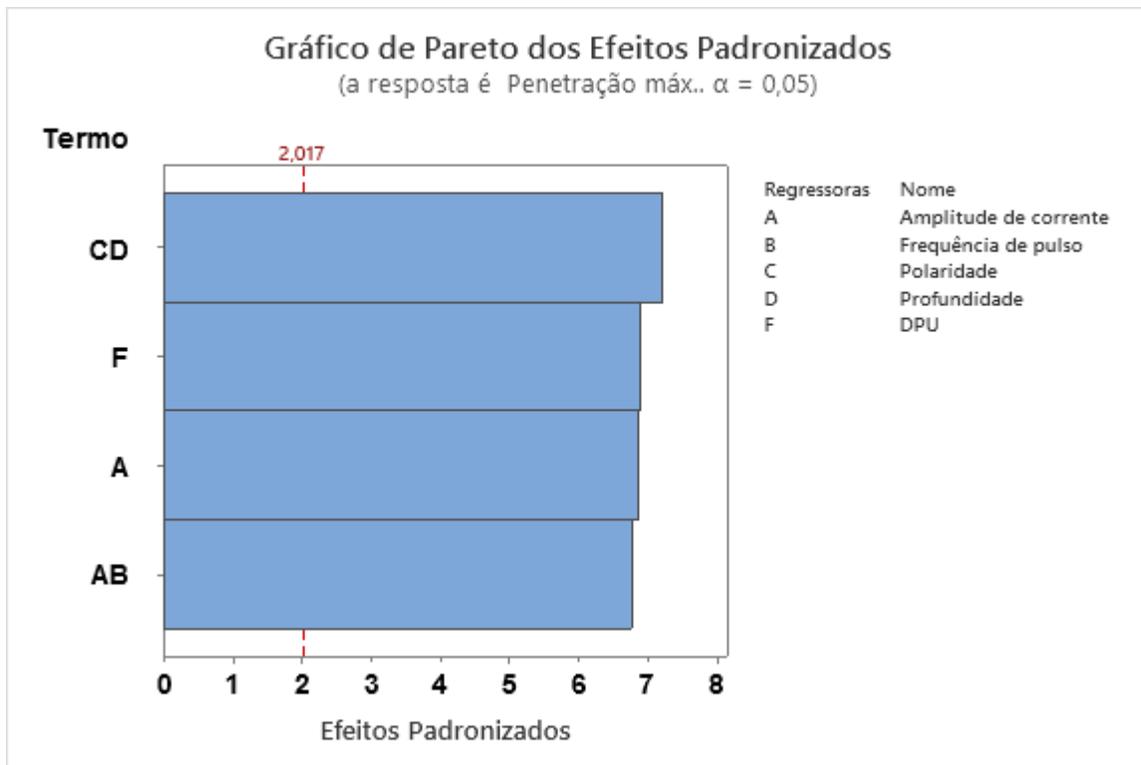
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	1	4,2269	27,38%	4,892	4,8917
Polaridade*Profundidade	1	5,5634	36,03%	5,563	5,5634
Erro	43	4,5951	29,76%	4,595	0,1069
Total	47	15,4401	100,00%		

Fonte	Valor F	Valor-P
Regressão	25,37	0,000
Amplitude de corrente	47,02	0,000
DPU	47,59	0,000
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	45,77	0,000
Polaridade*Profundidade	52,06	0,000
Erro		
Total		

Coeficientes

Termo	Coef	EP de Coef	IC de 95%
Constante	2,974	0,214	(2,541. 3,406)
Amplitude de corrente	0,01768	0,00258	(0,01248. 0,02288)
DPU	-0,4682	0,0679	(-0,6051. -0,3313)
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	-0,000095	0,000014	(-0,000124. -0,000067)
Polaridade*Profundidade	-0,01614	0,00224	(-0,02065. -0,01163)

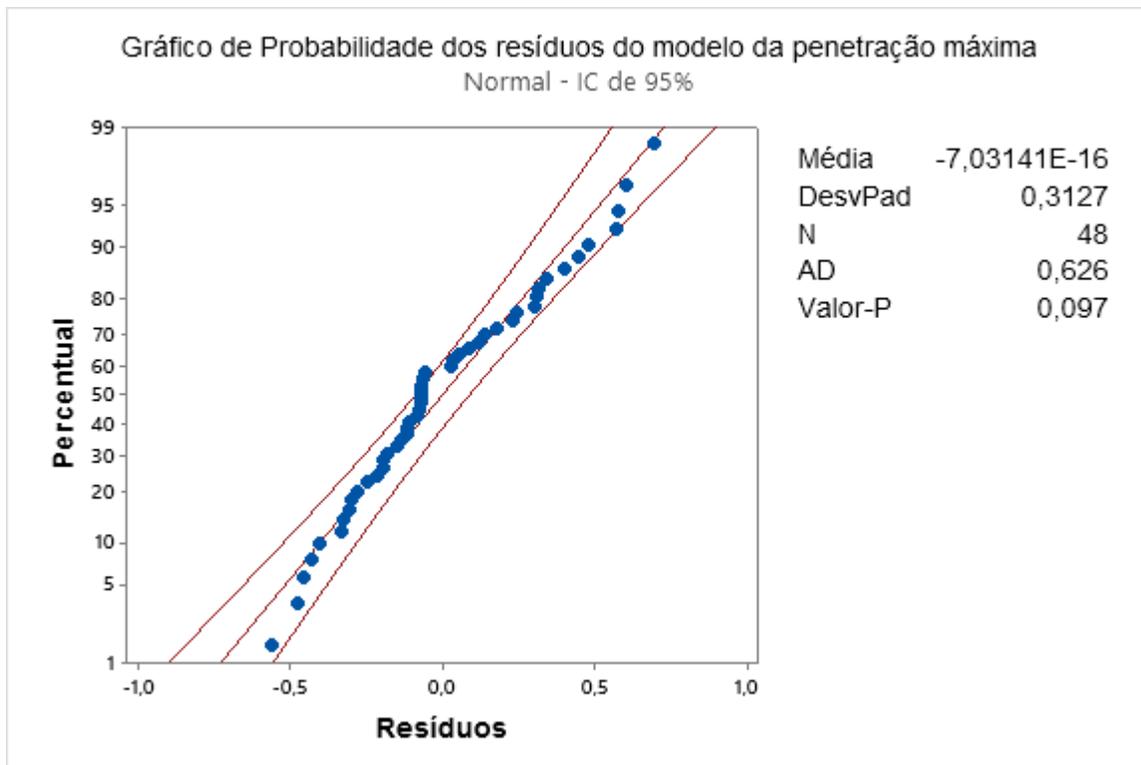
Termo	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	13,87	0,000	
Amplitude de corrente	6,86	0,000	2,69
DPU	-6,90	0,000	2,40
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	-6,77	0,000	2,08
Polaridade*Profundidade	-7,22	0,000	1,01



3.) Validação do modelo

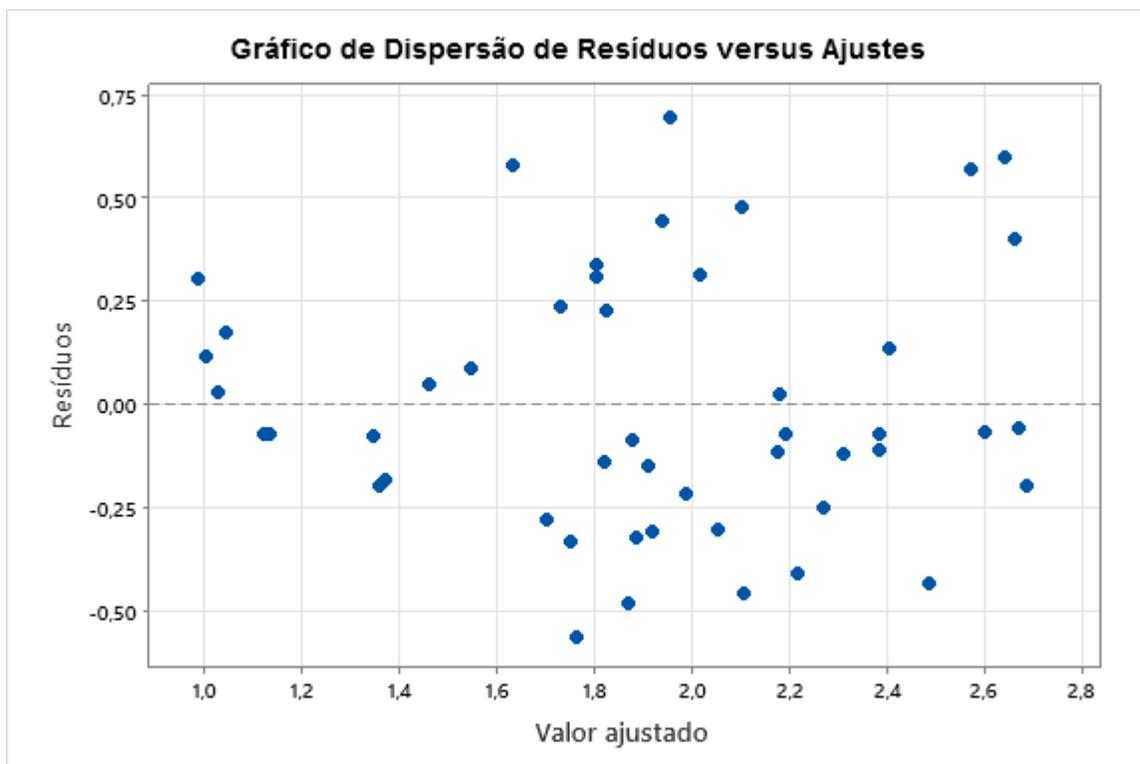
Distribuição normal dos resíduos

Como pode ser visto no gráfico de probabilidade do modelo da penetração máxima, os resíduos cumprem a hipótese da distribuição normal, já que o valor-P = 0,097



Homocedasticidade

Tal como se evidencia no gráfico de resíduos vs ajustes, o espalhamento dos pontos não exibe uma tendência clara. Consequentemente, o modelo cumpre com o pressuposto da homocedasticidade, uma vez que a variabilidade dos resíduos se mantém consistente em toda a faixa dos valores ajustados.



4.) Modelo final

Após a execução das etapas propostas, o modelo final que permite descrever o comportamento da penetração máxima é o seguinte:

Equação de Regressão

$$\begin{aligned} \text{Penetração máxima.} &= 2,974 + 0,01768 \text{ Amplitude de corrente} - 0,4682 \text{ DPU} \\ &- 0,000095 \text{ Amplitude de corrente} * \text{Frequência de pulso} \\ &- 0,01614 \text{ Polaridade} * \text{Profundidade} \end{aligned}$$

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
0,326901	70,24%	67,47%	5,59351	63,77%	37,65	46,83

APÊNDICE E – Modelo final da largura do cordão de solda

1.) Definição do modelo inicial

Tal como foi executado no modelo da tensão do arco, ao adicionar todas as regressoras, obteve-se um modelo com um R² baixo (menor do que 0,15). Nesse sentido, foram escolhidas as seguintes regressoras iniciais do modelo para a largura:

Variável resposta	Regressoras do modelo inicial na RLM
Tensão do arco	A + B + C + D + AB + AC + AD + BC + BD + CD + U + DPU + Icc

Onde A = Amplitude de pulso, B = frequência de pulso, C = polaridade, D = profundidade, e AB, AC, AD, BC, BD e CD são as suas interações.

2.) Eliminação de regressoras

Como pode ser visto, unicamente a *profundidade* e a *tensão do arco* apresentam um Valor-P $\leq 0,05$. Por conseguinte, serão removidas as demais variáveis e será executada uma nova análise de regressão com as regressoras remanescentes.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	7	39,3644	51,75%	39,3644	5,6235	6,13	0,000
Amplitude de corrente	1	0,1131	0,15%	2,0072	2,0072	2,19	0,147
Frequência de pulso	1	0,3024	0,40%	0,3661	0,3661	0,40	0,531
Polaridade	1	31,5414	41,46%	0,9427	0,9427	1,03	0,317
Profundidade	1	0,4351	0,57%	6,9856	6,9856	7,61	0,009
U	1	4,5595	5,99%	4,5677	4,5677	4,98	0,031
DPU	1	2,2433	2,95%	0,5711	0,5711	0,62	0,435
ICC	1	0,1695	0,22%	0,1695	0,1695	0,18	0,670
Erro	40	36,7044	48,25%	36,7044	0,9176		
Total	47	76,0688	100,00%				

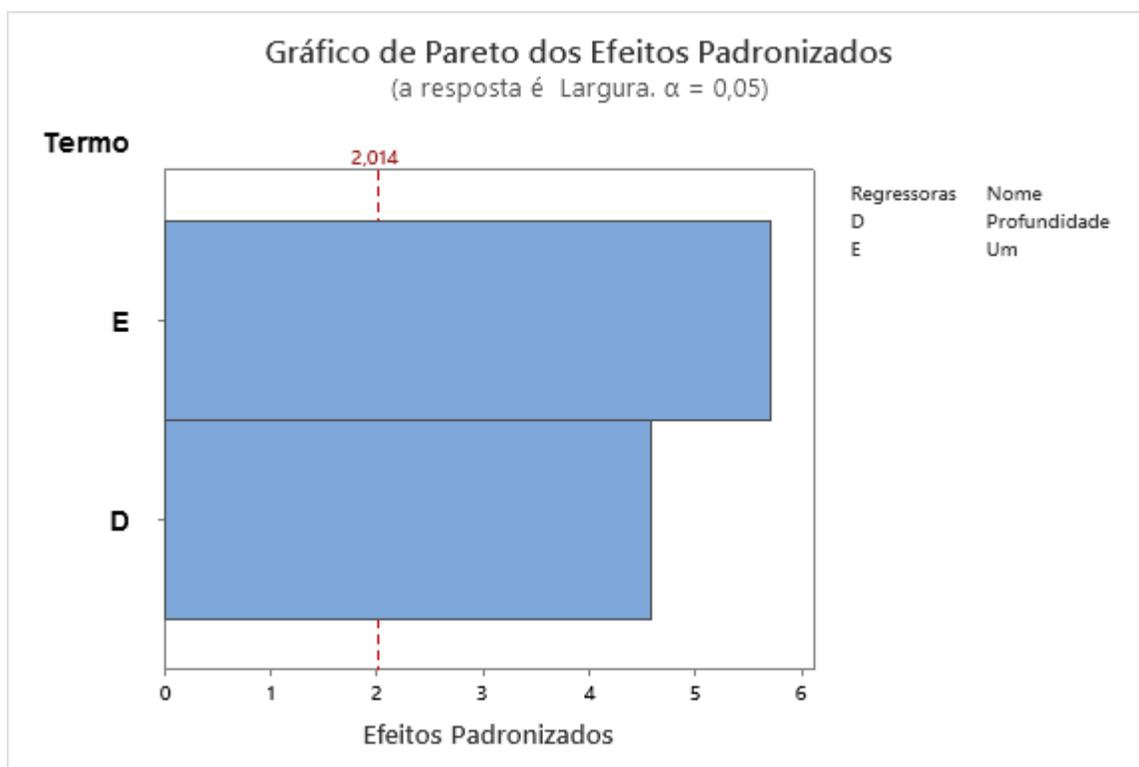
Após a etapa de eliminação, pode-se proceder à validação do modelo. Adicionalmente, na tabela de coeficiente pode-se ver que o VIF de todas as regressoras é inferior a 4.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	2	32,2728	42,43%	32,27	16,1364	16,58	0,000
Profundidade	1	0,4351	0,57%	20,38	20,3842	20,94	0,000
U	1	31,8377	41,85%	31,84	31,8377	32,71	0,000
Erro	45	43,7961	57,57%	43,80	0,9732		
Total	47	76,0688	100,00%				

Coeficientes

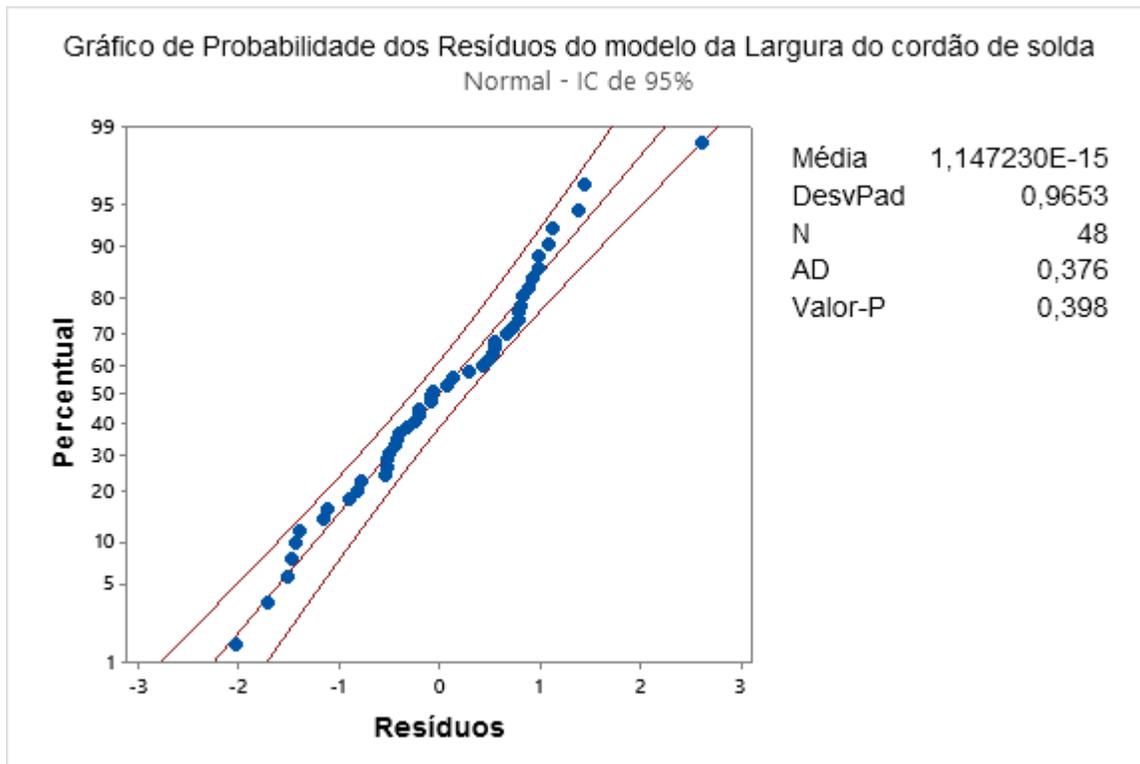
Termo	Coef	EP de Coef	IC de 95%	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	-0,23	1,86	(-3,98. 3,53)	-0,12	0,904	
Profundidade	0,0633	0,0138	(0,0355. 0,0912)	4,58	0,000	2,07
U	0,4148	0,0725	(0,2687. 0,5609)	5,72	0,000	2,07



3.) Validação do modelo

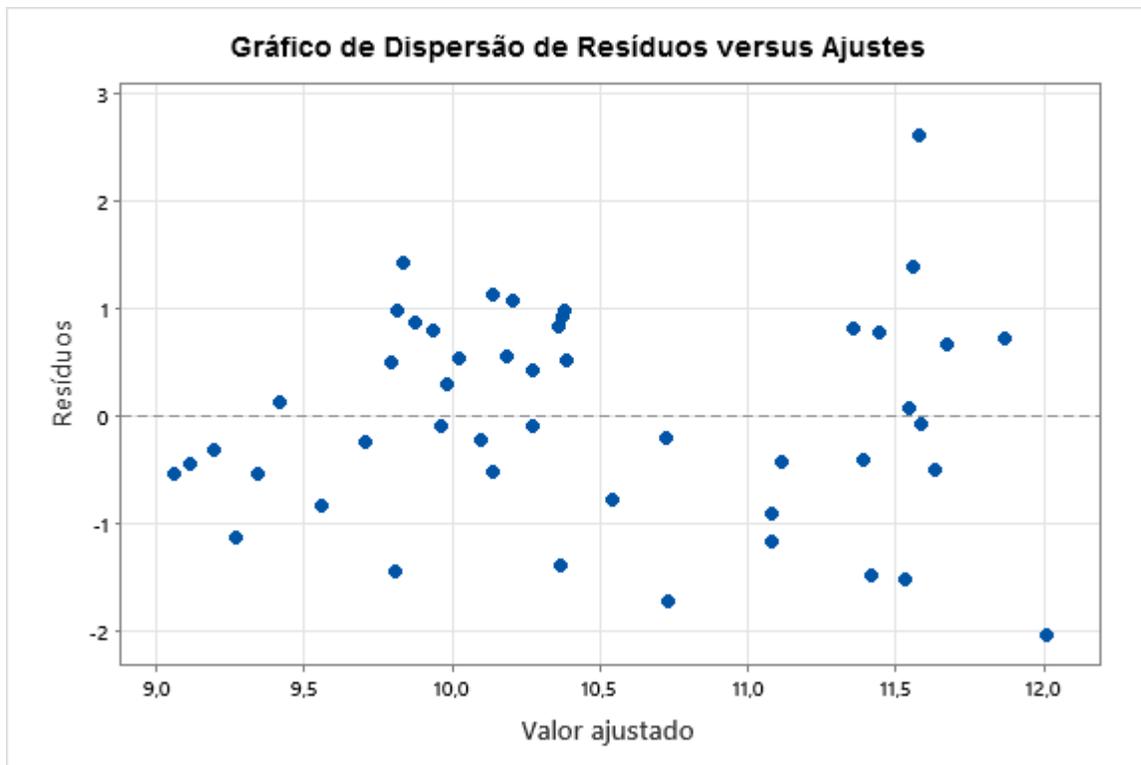
Distribuição normal dos resíduos

Como pode ser visto no gráfico de probabilidade do modelo da largura, os resíduos cumprem a hipótese da distribuição normal, já que o Valor-P= 0,398.



Homocedasticidade

Tal como se evidencia no gráfico de resíduos vs ajustes, o espalhamento dos pontos não exhibe uma tendência clara. Consequentemente, o modelo cumpre com o pressuposto da homocedasticidade, uma vez que a variabilidade dos resíduos se mantém consistente em toda a faixa dos valores ajustados.



4.) Modelo final

Após a execução das etapas propostas, o modelo final que permite descrever o comportamento da largura é o seguinte:

Equação de Regressão

$$\text{Largura} = -0,23 + 0,0633 \text{ Profundidade} + 0,4148 U$$

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
0,986532	42,43%	39,87%	50,2845	33,90%	140,75	147,30

APÊNDICE F – Modelo final da área de penetração do cordão de solda

1.) Definição do modelo inicial

As regressoras iniciais do modelo para área de penetração são as seguintes:

Variável resposta	Regressoras do modelo inicial na RLM
AP	A+B + C + D + AB+ AC + AD + BC + BD + CD + Tf + DPU + Icc + P + L

Onde A = Amplitude de pulso, B = frequência de pulso, C = polaridade, D = profundidade, e AB, AC, AD, BC, BD e CD são as suas interações.

2.) Eliminação de regressoras

Como pode ser visto, a *frequência de pulso*, *Um*, *Amplitude de corrente*polaridade*, *frequência de pulso*polaridade*, *polaridade*profundidade*, apresentam um Valor-P > 0,05. Por conseguinte, serão removidas e será executada uma nova análise de regressão com as regressoras remanescentes.

Análise de Variância

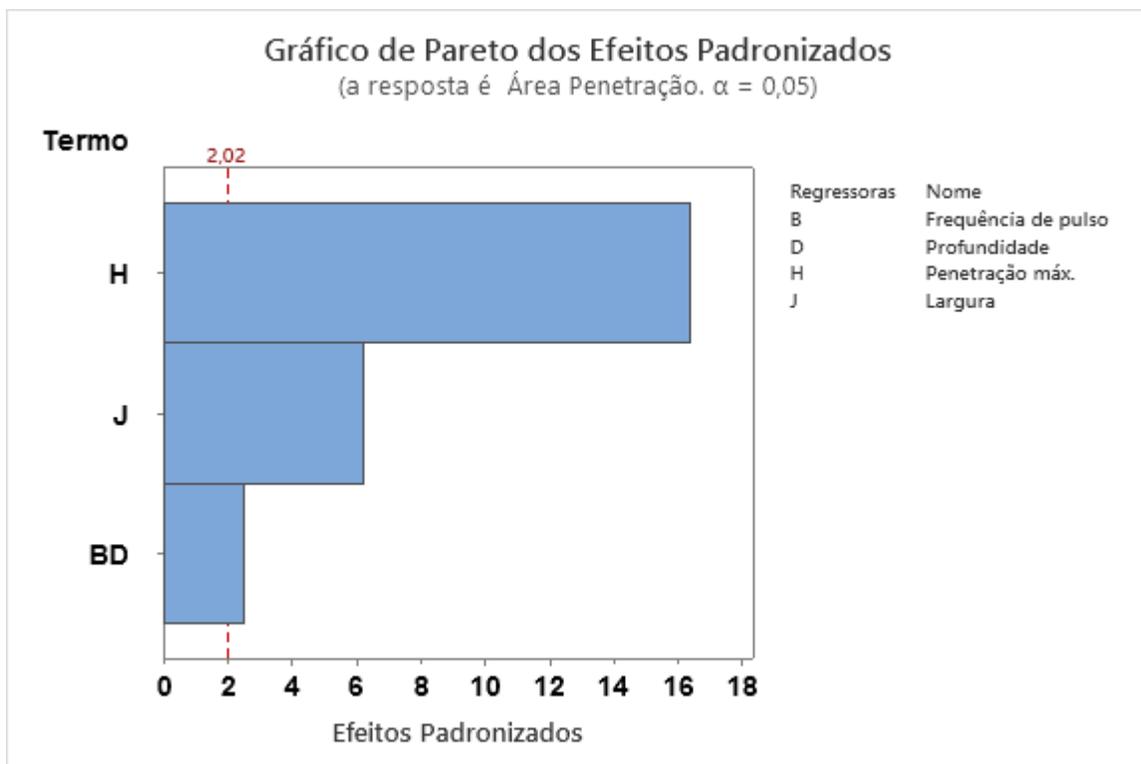
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)
Regressão	15	450,127	95,30%	450,127	30,0085
Amplitude de corrente	1	1,714	0,36%	1,006	1,0056
Frequência de pulso	1	2,770	0,59%	0,657	0,6566
Polaridade	1	4,681	0,99%	0,827	0,8269
Profundidade	1	149,990	31,76%	0,450	0,4504
TF	1	162,503	34,40%	1,405	1,4052
DPU	1	1,886	0,40%	0,179	0,1788
ICC	1	13,648	2,89%	0,658	0,6580
Penetração máx.	1	90,089	19,07%	21,676	21,6757
Largura	1	14,094	2,98%	9,707	9,7071
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	1	0,018	0,00%	0,293	0,2934
Amplitude de corrente*Polaridade	1	0,573	0,12%	1,903	1,9027
Amplitude de corrente*Profundidade	1	2,105	0,45%	0,016	0,0165
Frequência de pulso*Polaridade	1	1,251	0,26%	0,054	0,0538
Frequência de pulso*Profundidade	1	2,300	0,49%	4,367	4,3673
Polaridade*Profundidade	1	2,506	0,53%	2,506	2,5063
Erro	32	22,198	4,70%	22,198	0,6937
Total	47	472,324	100,00%		

Fonte	Valor F	Valor-P
Regressão	43,26	0,000
Amplitude de corrente	1,45	0,237
Frequência de pulso	0,95	0,338
Polaridade	1,19	0,283
Profundidade	0,65	0,426
Tf	2,03	0,164
DPU	0,26	0,615
Icc	0,95	0,337
P	31,25	0,000

L	13,99	0,001
Amplitude de corrente*Frequência de pulso	0,42	0,520
Amplitude de corrente*Polaridade	2,74	0,107
Amplitude de corrente*Profundidade	0,02	0,879
Frequência de pulso*Polaridade	0,08	0,782
Frequência de pulso*Profundidade	6,30	0,017
Polaridade*Profundidade	3,61	0,066
Erro		
Total		

Como pode ser visto, unicamente a *penetração máxima*, a *largura* e *Frequência de pulso * Profundidade* apresentam um Valor-P $\leq 0,05$. Por conseguinte, serão removidas as demais variáveis e será executada uma nova análise de regressão com as regressoras remanescentes.

Nesse sentido, o Gráfico de Pareto mostra que após a eliminação de variáveis em função da significância, a regressora *Frequência de pulso*profundidade* apresenta um impacto leve na resposta. Por conseguinte, será removida e novamente será executada uma nova análise de regressão



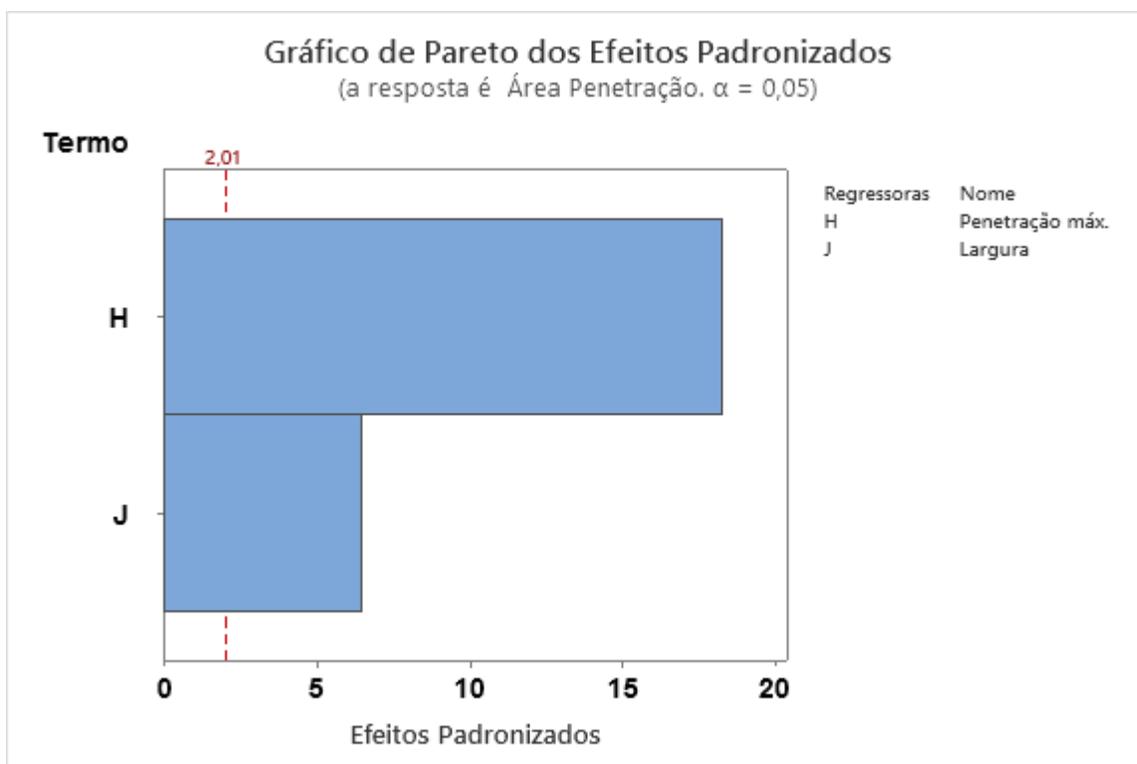
Após a etapa de eliminação, pode se proceder à validação do modelo. Adicionalmente, na tabela de coeficiente pode-se ver que o VIF de todas as regressoras é inferior a 4.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	2	418,46	88,60%	418,46	209,231	174,80	0,000
Penetração máx.	1	368,30	77,98%	398,74	398,740	333,13	0,000
Largura	1	50,16	10,62%	50,16	50,163	41,91	0,000
Erro	45	53,86	11,40%	53,86	1,197		
Total	47	472,32	100,00%				

Coefficientes

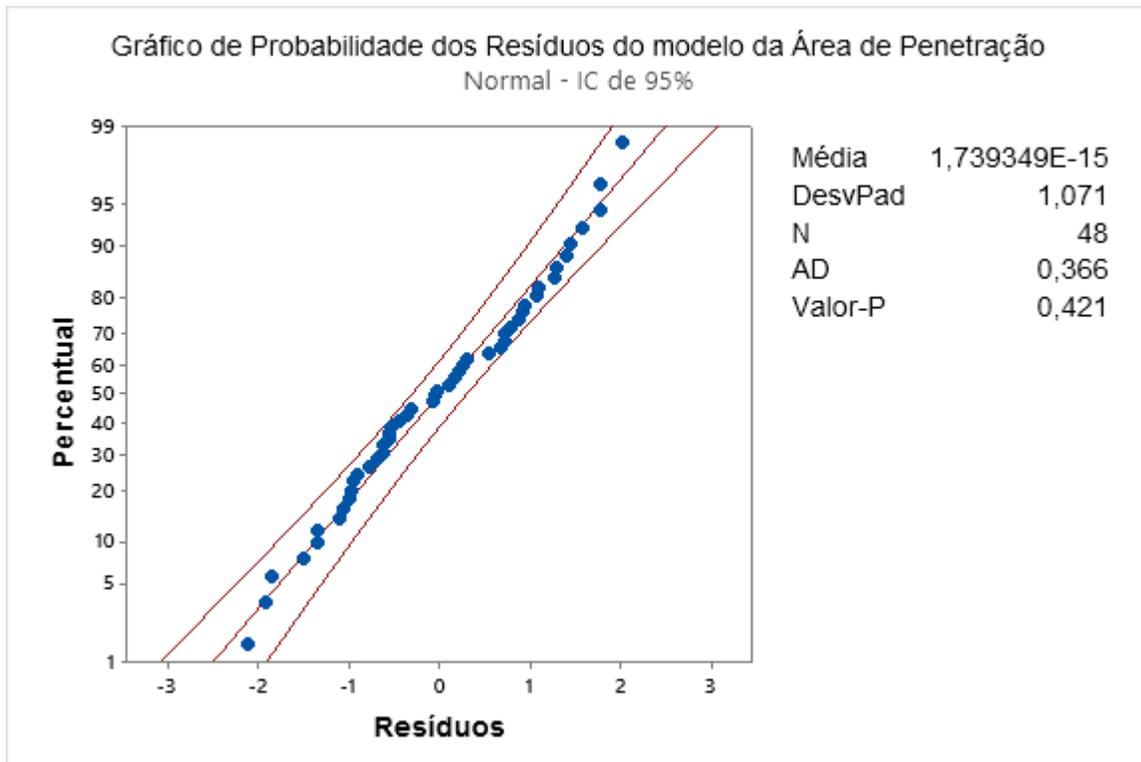
Termo	Coef	EP de Coef	IC de 95%	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	-10,20	1,98	(-14,20. -6,21)	-5,14	0,000	
Penetração máx.	6,045	0,331	(5,378. 6,712)	18,25	0,000	1,42
Largura	0,966	0,149	(0,665. 1,267)	6,47	0,000	1,42



3.) Validação do modelo

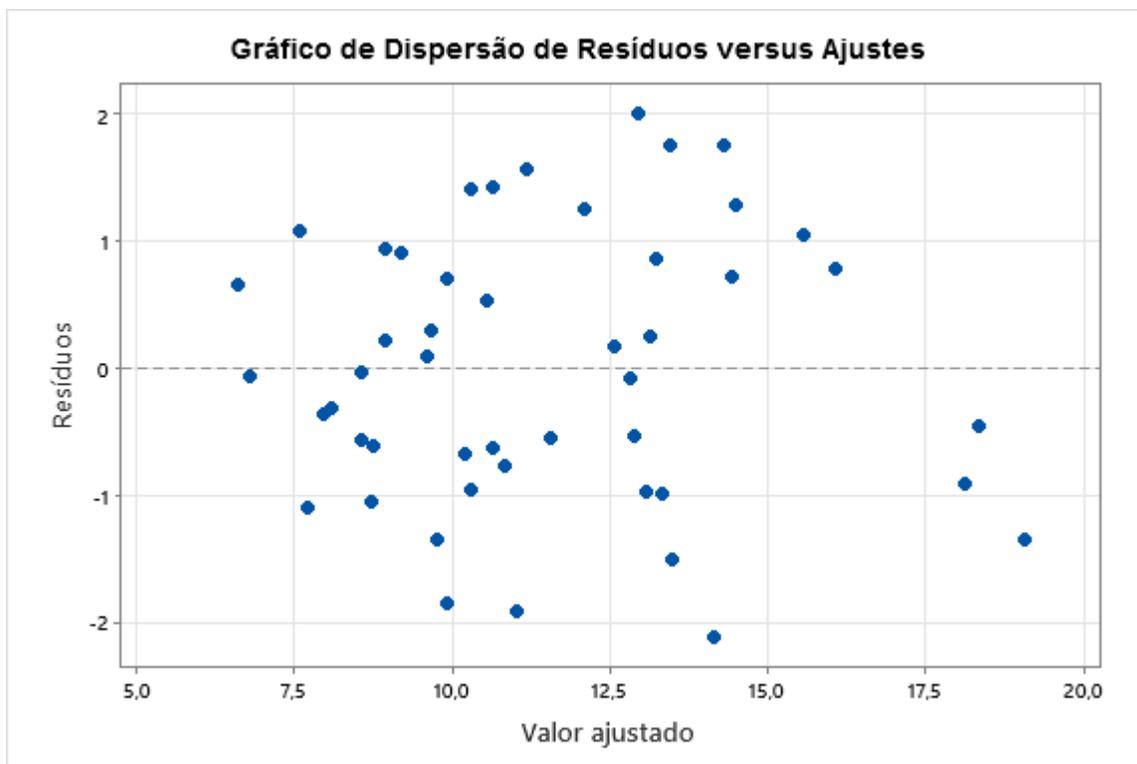
Distribuição normal dos resíduos

Como pode ser visto no gráfico de probabilidade do modelo da área de penetração, os resíduos cumprem a hipótese da distribuição normal, já que o Valor-P = 0,421.



Homocedasticidade

Tal como se evidencia no gráfico de resíduos vs ajustes, o espalhamento dos pontos não exibe uma tendência clara. Consequentemente, o modelo cumpre com o pressuposto da homocedasticidade, uma vez que a variabilidade dos resíduos se mantém consistente em toda a faixa dos valores ajustados.



4.) Modelo final

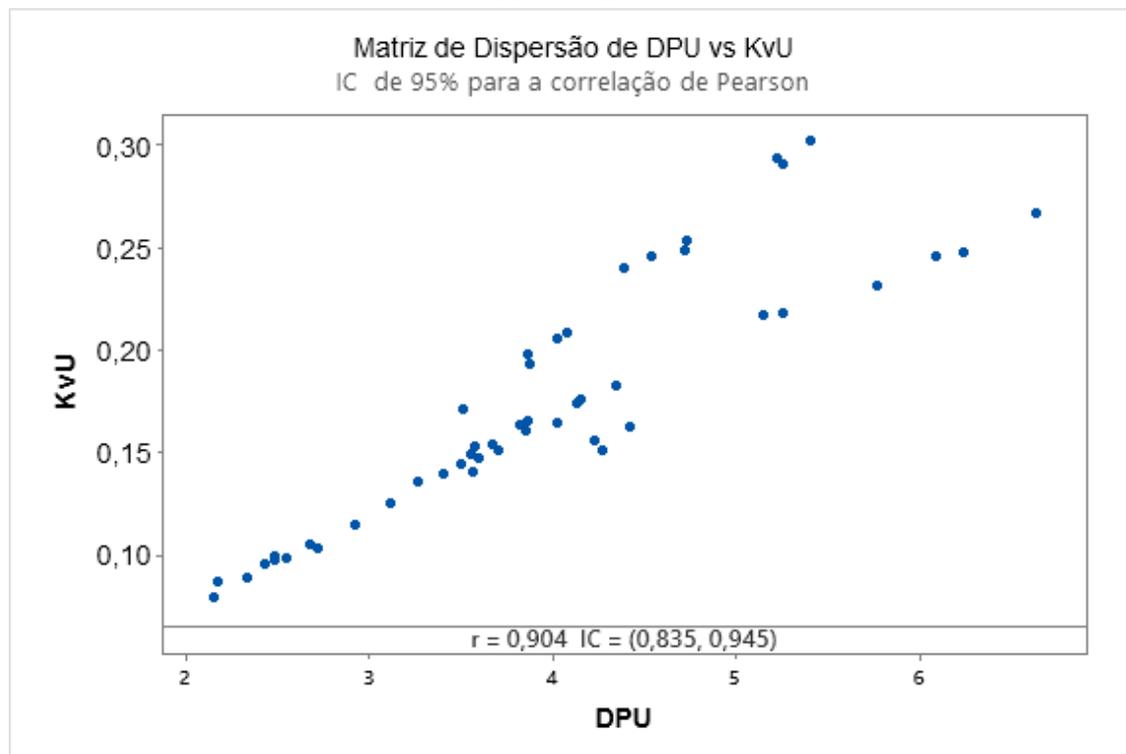
Após a execução das etapas propostas, o modelo final que permite descrever o comportamento da área de penetração é o seguinte:

Equação de Regressão

$$\begin{aligned} \text{Área de Penetração} &= -10,20 + 6,045 \text{ Penetração máxoma} \\ &+ 0,966 \text{ Largura} \end{aligned}$$

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
1,09405	88,60%	88,09%	62,6285	86,74%	150,68	157,23

APÊNDICE G – Correlação de Pearson***DPU vs KvU***

Icc vs DPU