

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Eduardo José Sánchez Lobo

**Estudo do desempenho operacional e da  
morfologia do cordão de solda depositado com  
arames tubulares autoprottegidos com adição de  
níquel utilizados na soldagem subaquática  
molhada**

Belo Horizonte

2024

Eduardo José Sánchez Lobo

# **Estudo do desempenho operacional e da morfologia do cordão de solda depositado com arames tubulares autoprotégidos com adição de níquel utilizados na soldagem subaquática molhada**

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: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias

Belo Horizonte

2024

S211e Sánchez Lobo, Eduardo José.  
Estudo do desempenho operacional e da morfologia do cordão de solda depositado com arames tubulares autoprotégidos com adição de níquel utilizados na soldagem subaquática molhada [recurso eletrônico] / Eduardo José Sánchez Lobo. - 2024.  
1 recurso online (93 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Ariel Rodriguez Arias.

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

Apêndices: f. 81-93.

Bibliografia: f. 71-80.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Níquel - Teses. 3. Soldagem subaquática - Teses. 4. Estabilidade – Teses. I. Rodríguez Arias, Ariel. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



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

## FOLHA DE APROVAÇÃO

# **“ESTUDO DO DESEMPENHO OPERACIONAL E DA MORFOLOGIA DO CORDÃO DE SOLDA DEPOSITADO COM ARAMES TUBULARES AUTOPROTEGIDOS COM ADIÇÃO DE NÍQUEL UTILIZADOS NA SOLDAGEM SUBAQUÁTICA MOLHADA”**

**EDUARDO JOSE SANCHEZ LOBO**

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 de Mecânica/UFMG), Dr. Eduardo Jose Lima II (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG) e Dr. José Gedael Fagundes Júnior (Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira/UNESP), 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 12 de  
setembro de 2024. Por:



Documento assinado eletronicamente por **Ariel Rodriguez Arias, Chefe de departamento**, em 11/10/2024, às 16:05, 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 **José Gedael Fagundes Júnior, Usuário Externo**, em 13/11/2024, às 09:15, 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 **Eduardo Jose Lima li, Professor do Magistério Superior**, em 13/11/2024, às 13:11, 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](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3614742** e o código CRC **DF23EAB2**.

---

**Referência:** Processo nº 23072.250119/2024-69

SEI nº 3614742

---

*Aos meus pais e os meus irmãos pelo amor, paciência e compreensão.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer ao Deus da vida por cada uma das experiências que me permitiu vivenciar durante o mestrado.

Ao meu orientador Prof. Ariel Rodríguez Arias pelo conhecimento compartilhado, pela paciência e pelo apoio recebido, muito obrigado por me acolher no LRSS e fazer dele minha segunda casa.

Ao Andrés Moreno Uribe, por ser a primeira pessoa a me mostrar que a soldagem é uma paixão e por abrir as portas para a mobilidade dos estudantes colombianos.

Ao Mauricio Castellanos, pela sincera amizade durante todo o período de pós-graduação e por compartilhar sua experiência e conhecimento no laboratório LRSS.

À Andrea Amaya, minha companheira de vida, pelo apoio incondicional e por ser minha motivação para dar sempre o melhor em cada um dos meus projetos de vida.

À minha família que sempre acredita no meu poder e sempre recebo seu apoio incondicional.

Aos meus amigos da Colômbia por se alegrarem com cada um dos meus triunfos como se fossem deles, especialmente a Bryan Sepúlveda, a quem presto homenagem com esta conquista.

Ao João, Daniel, Gabriel e Joauro, por me permitirem participar de seus TCCs e compartilhar conhecimentos em cada uma de suas vidas e projetos.

À minha Bancada Examinadora, por aceitar acompanhar de perto neste processo e neste projeto e por me proporcionar o amplo conhecimento e aprendizado com cada um deles.

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 soldagem subaquática molhada tem uma ampla aplicação no reparo e manutenção de estruturas destinadas para a extração de petróleo, estações ou plataformas offshore, indústria naval e reatores nucleares. O processo SMAW é a técnica mais utilizada devido à sua simplicidade de operação, no entanto, surge o processo FCAW como alternativa de ampla aceitação devido à maior produtividade, além de se obter resultados semelhantes em relação a qualidade do cordão de solda depositado com o processo SMAW. Por tanto, o objetivo deste trabalho é o estudo operacional e a caracterização da morfologia de cordões de solda realizados com o processo FCAW. Para isso, foram fabricados dois arames tubulares autoprotetidos com adição de níquel (60 % e 70 % em peso de níquel). Posteriormente, foram depositados cordões de solda na posição plana, sendo executada uma matriz experimental com três fatores, visando a mudança da polaridade, tipo de arame e condição de operação (soldagem ao ar, soldagem molhada em 0,3 e 30 m de profundidade). Como resultado, a estabilidade do processo diminuiu drasticamente no maior nível de condição de operação. Obteve-se que o valor médio do coeficiente de variação da corrente aumentou na soldagem molhada em 0,3 m em comparação com a soldagem ao ar. Posteriormente, a constrição do arco devido à pressão hidrostática causou maior dificuldade para manutenção do arco. Além disso, o tipo de arame com maior teor de níquel na polaridade DCEN em 30 m foi o tratamento experimental com maior instabilidade. Adicionalmente, o aumento do aporte térmico devido a mudança de soldagem ao ar para soldagem molhada e o posterior acréscimo da profundidade, apresentou uma correlação positiva com a penetração máxima do cordão de solda.

Palavras-chave: Soldagem subaquática molhada, arame tubular autoprotetido, processo FCAW, Níquel, estabilidade do processo, morfologia do cordão de solda, constrição do arco, aporte térmico.

## ABSTRACT

Underwater wet welding has a wide application in the repair and maintenance of structures designed for oil extraction, offshore stations or platforms, the naval industry and nuclear reactors. The SMAW process is the most widely used technique due to its simplicity of operation. However, the FCAW process has become a widely accepted alternative due to its greater productivity, in addition to obtaining similar results in relation to the quality of the weld bead deposited with the SMAW process. Therefore, the aim of this work is to conduct an operational study and characterize the morphology of weld seams made using the FCAW process. Therefore, the aim of this work is to conduct an operational study and characterize the morphology of weld seams made using the FCAW process. For this purpose, two self-shielded tubular wires with nickel added (60% and 70% nickel by weight) were manufactured. Subsequently, weld beads were deposited in the flat position, and an experimental matrix was run with three factors, to change the polarity, type of tubular wire and operating condition (air welding, wet welding at 0.3 and 30 m depth). As a result, the stability of the process decreased dramatically at the highest level of operating condition. It was found that the average value of the current coefficient of variation increased in wet welding at 0.3 m compared to air welding. Subsequently, the constriction of the arc due to hydrostatic pressure caused greater difficulty in maintaining the arc. Furthermore, the type of tubular wire with the highest nickel content in DCEN polarity at 30 m was the experimental treatment with the greatest instability. In addition, the increase in heat input due to the change from air welding to wet welding and the subsequent increase in depth showed a positive correlation with the penetration of the weld bead.

Keywords: Underwater wet welding, self-shielded flux-cored wire, FCAW process, nickel, process stability, weld bead morphology, arc constriction, heat input.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Técnicas de soldagem subaquática  | 19 |
| Figura 2 - Câmara utilizada na soldagem seca   | 19 |
| Figura 3 - Efeito da mudança do ambiente de operação   | 20 |
| Figura 4 - Hidrogênio difusível no metal de solda depositado com eletrodos com polímero (pol) e convencionais (Conv) nas duas polaridades (DCEP e DCEN)                          | 24 |
| Figura 5 - Teor de oxigênio no metal de solda depositado com eletrodos com polímero (pol) e convencionais (Conv) nas duas polaridades (DCEP e DCEN)                              | 24 |
| Figura 6 - Relação entre a porcentagem em peso de PTFE e o hidrogênio difusível no metal de solda  | 25 |
| Figura 7 - Reação química na atmosfera do arco para o arame tubular com adição de PTFE   | 26 |
| Figura 8 - Hidrogênio difusível e residual no metal de solda de cordões depositados com eletrodos ferrítico e austeníticos.  | 27 |
| Figura 9 - Efeito da profundidade na porosidade  | 28 |
| Figura 10 - Efeito da profundidade na porosidade   | 30 |
| Figura 11- Quantidade de investigações realizadas sobre arame tubular na soldagem molhada  | 31 |
| Figura 12 - Publicações sobre aplicação de arame tubular na soldagem molhada nos centros de investigação e institutos de soldagem  | 31 |
| Figura 13 - Faixas de tensão do arco e corrente nas quais se evidenciam diferentes tipos de transferência metálica na soldagem molhada com arame tubular a 0,5 m de profundidade | 32 |
| Figura 14 - Esquema que representa a transferência globular repelida   | 34 |
| Figura 15 - Oscilograma de tensão do arco e corrente de soldagem onde acontece transferência globular repelida   | 34 |
| Figura 16 - Oscilograma de tensão do arco e corrente de soldagem onde acontece transferência globular repelida por ângulo obtuso (ângulo de desprendimento maior que 90°)        | 35 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 17 - Oscilograma de tensão do arco e corrente de soldagem onde acontece transferência globular repelida por ângulo agudo (ângulo de desprendimento menor que 90°) | 35 |
| Figura 18 - Esquema que representa a transferência globular por tensão superficial   | 36 |
| Figura 19 - Forças envolvidas na transferência globular por tensão superficial e curto circuito explosivo  | 37 |
| Figura 20 - Oscilograma de tensão do arco e corrente de soldagem onde acontece transferência por tensão superficial  | 37 |
| Figura 21 - Esquema que representa a transferência por curto circuito explosivo  | 38 |
| Figura 22 - Oscilograma de tensão do arco e corrente de soldagem onde acontece transferência por curto circuito explosivo.   | 39 |
| Figura 23 - Esquema que representa a transferência por arco submerso   | 40 |
| Figura 24 - Oscilograma de tensão do arco e corrente de soldagem onde acontece transferência por arco submerso.  | 40 |
| Figura 25 – Representação esquemática da fita metálica – (a) dimensões (b) rolo de fita  | 41 |
| Figura 26 – Dimensões do metal de solda utilizado  | 42 |
| Figura 27 – Divisor de Rifles com 16 grelhas   | 43 |
| Figura 28 – Máquina para fabricação de arame tubular   | 44 |
| Figura 29 – Tambor de tracionamento e bobinado do arame  | 44 |
| Figura 30 – Dente raspador que retira o excesso de fluxo   | 45 |
| Figura 31 – Embutidora   | 46 |
| Figura 32 – Microscópio ótico  | 47 |
| Figura 33 – Esquema que mostra a câmara hiperbárica e o dispositivo semiautomático uniaxial utilizado na deposição dos cordões de solda.                                 | 48 |
| Figura 34 – Metodologia usada para a toma dos sinais elétricos de tensão do arco e corrente  | 50 |
| Figura 35 – Cortes transversais realizados no início dos cordões de solda  | 51 |
| Figura 36 – Dimensões mensuradas na seção transversal do cordão de solda.  | 51 |
| Figura 37 – Gráficos Boxplot e distribuição dos dados.   | 52 |
| Figura 38- Seção transversal dos arames tubulares N1 e N2  | 53 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 39 - Boxplot do efeito da polaridade sobre o coeficiente de variação da corrente de soldagem                   | 56 |
| Figura 40 - Boxplot do efeito do tipo de arame tubular sobre o coeficiente de variação da corrente de soldagem        | 56 |
| Figura 41- Boxplot do efeito da condição sobre o coeficiente de variação da corrente de soldagem                      | 58 |
| Figura 42 - Boxplot do efeito da condição sobre a frequência de curto circuito  | 58 |
| Figura 43- Ciclogramas de potência representativos do efeito da condição na região de curto circuito                  | 59 |
| Figura 44 - Boxplot do efeito do tipo de arame sobre a frequência de curto circuito                                   | 60 |
| Figura 45 - Boxplot do efeito do tipo de arame sobre a frequência de curto circuito                                   | 60 |
| Figura 46 - Boxplot do efeito da condição sobre a penetração máxima   | 63 |
| Figura 47 -Gráfico de contorno do efeito do aporte térmico e o aumento no nível de condição sobre a penetração máxima | 63 |
| Figura 48 - Boxplot do efeito da condição sobre o reforço máximo.   | 64 |
| Figura 49 - Boxplot do efeito da polaridade sobre a largura do cordão de solda  | 65 |
| Figura 50 - Cordões de solda depositados na soldagem atmosférica, com os dois arames e nas duas polaridades.          | 67 |
| Figura 51 - Cordões de solda depositados em 0,3 m de profundidade, com os dois arames e nas duas polaridades.         | 67 |
| Figura 52 - Cordões de solda depositados em 30 m de profundidade, com os dois arames e nas duas polaridades.          | 67 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Hidrogênio difusível e residual no metal de solda de eletrodos rutilicos e com adição de hematita (oxidantes) | 22 |
| Tabela 2 – Hidrogênio difusível em eletrodo oxidante (A) e eletrodos rutilicos (E, D, B, C)                              | 23 |
| Tabela 3 – Parâmetros experimentais na soldagem de um aço inoxidável duplex S32101                                       | 29 |
| Tabela 4. Composição química da fita metálica  | 42 |
| Tabela 5. Composição química do fluxo dos arames tubulares autoprottegidos   | 42 |
| Tabela 6. Composição química do metal de base  | 42 |
| Tabela 7 – Relação da velocidade de trefilado  | 45 |
| Tabela 8 – Parâmetros fixos para todos os experimentos.  | 48 |
| Tabela 9– Parâmetros variáveis (fatores) e seus níveis   | 52 |
| Tabela 10 – Taxa de enchimento mensurada para os arames tubulares N1 e N2  | 54 |
| Tabela 11 - Dados coletados do comportamento elétrico do processo  | 55 |
| Tabela 12 - Dados coletados da morfologia do cordão de solda   | 61 |
| Tabela 13 - Dados coletados da morfologia do cordão de solda   | 62 |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>                                    | <b>16</b> |
| 1.1 Objetivos.....  | 17        |
| 1.1.1 Objetivo Geral.....                                   | 17        |
| 1.1.2 Objetivos Específicos.....                            | 17        |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                         | <b>18</b> |
| 2.1 Soldagem subaquática.....                               | 18        |
| 2.2 Problema inerentes na soldagem subaquática molhada..... | 20        |
| 2.2.1 Trincamento a frio .....                              | 20        |
| 2.2.2 Porosidade.....                                       | 27        |
| 2.3 Soldagem subaquática molhada com arame tubular.....     | 30        |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                           | <b>41</b> |
| 3.1 Materiais.....  | 41        |
| 3.1.1 Arames tubulares experimentais e metal de base.....   | 41        |
| 3.2 Metodologia e equipamentos.....                         | 43        |
| 3.2.1 Fabricação de arame tubular.....                      | 43        |
| 3.2.2 Caracterização do arame tubular fabricado.....        | 45        |
| 3.3 Produção dos cordões de solda.....                      | 47        |
| 3.4 Dados do experimento.....                               | 49        |
| 3.4.1 Análise de sinais elétricas.....                      | 49        |
| 3.4.2 Caracterização da morfologia do cordão de solda.....  | 50        |
| 3.5 Fatores experimentais e Análise de Variância ANOVA..... | 51        |
| <b>4 RESULTADOS.....</b>                                    | <b>53</b> |
| 4.1 Caracterização dos arames tubulares obtidos.....        | 53        |
| 4.2 Estabilidade do arco.....                               | 54        |
| 4.3 Morfologia do cordão de solda.....                      | 61        |
| 4.4 Aparência superficial do cordão de solda.....           | 65        |
| <b>5 CONCLUSÃO.....</b>                                     | <b>68</b> |
| <b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>              | <b>70</b> |

**REFERÊNCIAS..... 71**  
**APÊNDICES..... 81**

## 1 INTRODUÇÃO

A soldagem subaquática molhada tem grande aplicação nas indústrias naval, petrolífera e nuclear já que se reduzem custos na manutenção de estruturas (GONZÁLEZ et al., 2016). Diferentemente da soldagem seca, não exige o uso de câmaras hiperbáricas que elevam o custo de reparação nas estações de trabalho (TOMKÓW e JANECEK, 2019). Em contraste, como o processo é executado em contacto direto com a água, o rápido resfriamento e um alto teor de hidrogênio e oxigênio resultantes da dissociação da molécula de água, causam problemas operacionais como a instabilidade, porosidade e trincamento a frio (PESSOA e LIU, 2021).

Segundo NIXON e BILLINGHAM (1987) a técnica mais utilizada é o processo SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) ou MMA (*Manual Metal Arc Welding*), que se caracteriza pela utilização de eletrodos revestidos que são constituídos por um núcleo metálico e um revestimento externo que fornece a proteção necessária para a poça de fusão e o arco elétrico formado, permitindo que a solda consiga ser realizada (BRACARENSE et al., 2021). No entanto, toda vez que o eletrodo é consumido o soldador mergulhador tem que substituí-lo, o que causa tempos improdutivos e pode gerar variabilidade ao longo do cordão depositado (LABANOWSKI et al., 2008). Por esta razão, pesquisas têm sido realizadas com o intuito de implementar processos que auxiliem a soldagem subaquática molhada, a fim de minimizar custos operacionais e tempos de processo, sem comprometer a qualidade e integridade das estruturas soldadas (GYASI, 2019).

Neste sentido, o processo FCAW (*Flux Cored Arc Welding*) emerge como uma alternativa promissora, com um grande volume de estudo e aceitação crescente. Este método utiliza um eletrodo tubular autoprottegido e contínuo, aumentando a produtividade dos trabalhos de reparo e conseguindo preservar a qualidade do cordão de solda (CHEN et al., 2022). Adicionalmente, o processo permite a automatização visando a sua utilização em maiores profundidades, elevando o nível de segurança e viabilidade dos projetos de manutenção (GONÇALVES, 2016). Tal como explicam (CASTELLANOS-GONZALEZ et al., 2021), similar ao eletrodo revestido, o arame tubular autoprottegido permite a adição de elementos que modificam as características do arco e a composição do metal de solda.

Nesse contexto, a literatura destaca a importância de consumíveis com adição de níquel (LI et al., 2018). Segundo RAMOS (2009), a presença de níquel no metal de solda contribui na estabilização da austenita a temperatura ambiente, o que auxilia na diminuição de trincamento a frio, porque a austenita possui maior solubilidade de hidrogênio do que a ferrita (CHAN, 1999). Adicionalmente, a adição de níquel melhora as propriedades metalúrgicas e mecânicas das juntas soldadas (MARTIN et al., 2011). Assim, o presente trabalho mostra a fabricação de dois arames tubulares autoprotégidos com 60 e 70 % em peso de níquel, com a finalidade de estudar o efeito da polaridade, condição de operação e tipo de arame tubular no comportamento operacional e na morfologia do cordão de solda depositado.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Estudar o desempenho operacional e a morfologia do cordão de solda depositado com arames tubulares autoprotégidos com adição de níquel utilizados na soldagem subaquática molhada.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Executar o processo de manufatura do arame tubular, garantindo a qualidade do consumível para posterior deposição de cordões de solda na posição plana.

Analisar o efeito do tipo de arame tubular, polaridade e condição de operação na estabilidade do processo e o comportamento operacional.

Caracterizar a morfologia da seção transversal e realizar a inspeção da qualidade superficial do cordão de solda depositado nos diferentes níveis do tipo de arame tubular, polaridade e condição de operação.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

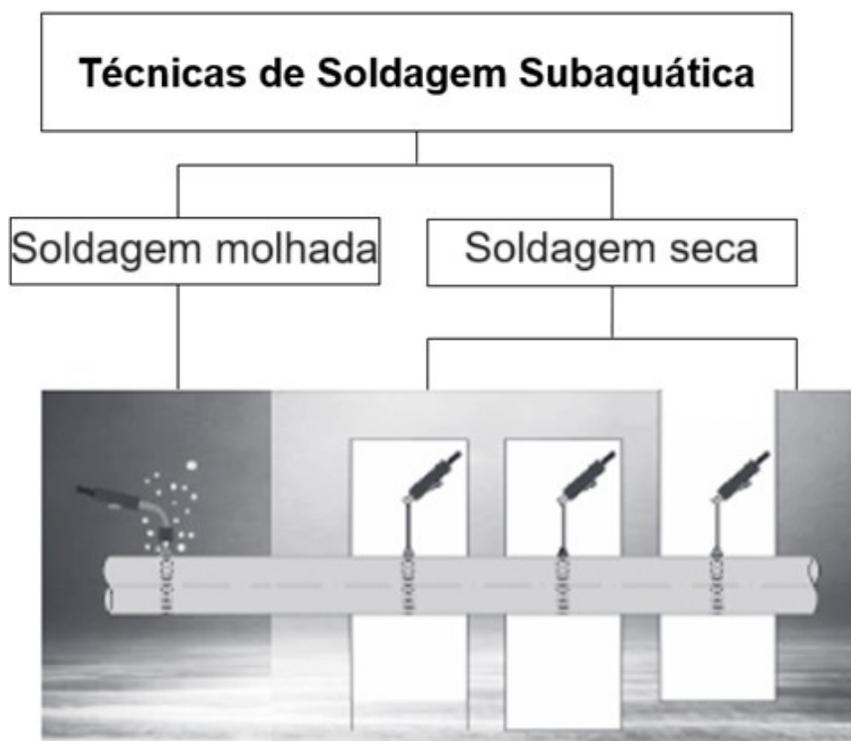
### 2.1 Soldagem subaquática.

A utilização de plataformas petrolíferas offshore, a instalação de oleodutos, reparo de embarcações offshore e construção e manutenção de tanques de reatores nucleares tiveram um aumento do seu aproveitamento e sua vida útil desde a implantação da soldagem subaquática (ISIKLAR e GIRGIN, 2011.; GARAIĆ et al., 2010; GAO et al., 2011). A soldagem subaquática pode ser dividida em duas técnicas (Ver Figura 1).

Por um lado, DI et al. (2015), explicam que a soldagem subaquática seca se realiza com o uso de câmaras hiperbáricas que protegem o metal de solda da água circundante, controlando as condições ambientais e assemelhando-se ao processo realizado ao ar. A soldagem subaquática seca permite uma boa qualidade do cordão depositado, no entanto, o custo de aplicação é muito elevado porque o equipamento necessário para esta técnica é relativamente caro em comparação com a soldadura subaquática molhada. Também, representa perigo para os soldadores, porque devem passar semanas nas câmaras hiperbáricas expostos aos gases procedentes do processo de soldagem, além da alta radiação, conforme representado na Figura 2.

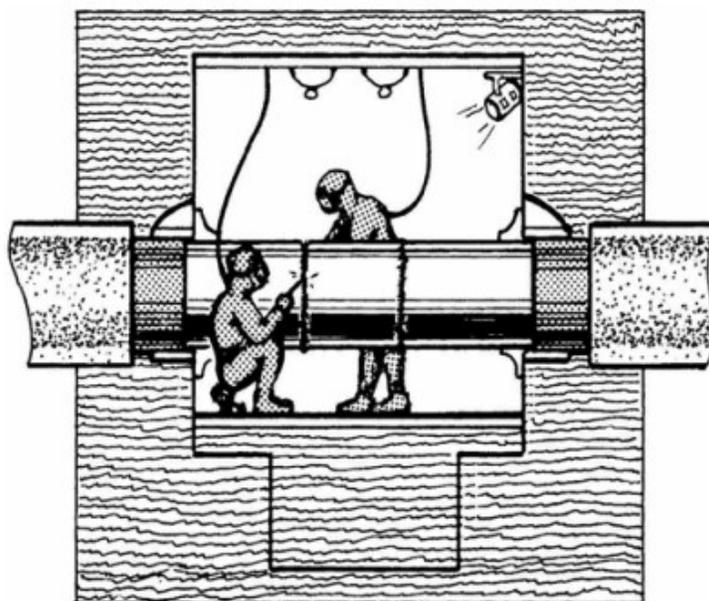
Por outro lado, LABANOWSKI et al. (2008), explicam que a soldagem subaquática molhada se realiza em contacto direto com a água. Contudo, a presença de água induz o resfriamento acelerado, gerando um forte choque térmico que pode afetar a microestrutura, diminuindo a integridade mecânica da junta soldada e diminuindo a sua qualidade (MUHAYAT et al., 2020). Adicionalmente, o soldador mergulhador pode contrair doenças derivadas da exposição a altas temperaturas e ao ambiente adverso (ARIAS et al., 2018; ANAND e KHAJURIA, 2015).

Figura 1 - Técnicas de soldagem subaquática



Fonte: adaptado de ŁABANOWSKI et al. (2008)

Figura 2 - Câmara utilizada na soldagem seca

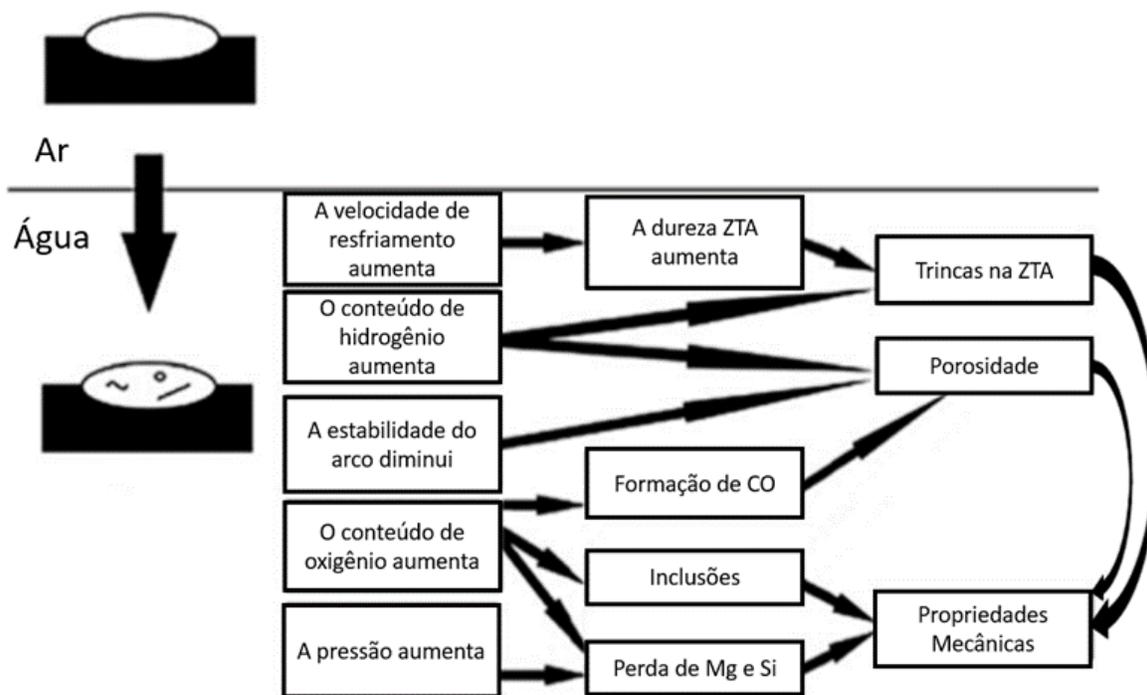


Fonte: ŁABANOWSKI et al. (2008)

## 2.2 Problema inerentes na soldagem subaquática molhada

Como pode ser visto na Figura 3, as condições inerentes de um ambiente aquoso, como a alta pressão hidrostática, a baixa temperatura e a presença de água em contato direto com a poça de fusão, são as principais causas de problemas no processo de soldagem subaquática molhada (ŁABANOWSKI, 2011). Contudo, KLETT et al. (2020a); e PESSOA e LIU (2021), comentam que o trincamento a frio e a porosidade são os dois problemas mais importantes a serem investigados na soldagem subaquática molhada

Figura 3 - Efeito da mudança do ambiente de operação



Fonte: adaptado de FYDRYCH et al. (2016) e VASHISHTHA et al. (2022)

### 2.2.1 Trincamento a frio

Como é mencionado por CLEMENTE-CARDOSO (2022), o hidrogênio difusível é um fator que limita as operações de soldagem subaquática molhada, porque sua difusão como resultado da decomposição da água favorece ao surgimento de trincas que podem diminuir a vida útil das estruturas reparadas (RODRIGUEZ e BRACARENSE, 2017).

Segundo SWIERCZYNSKA et al. (2017), a modificação da composição química do metal de adição tem sido uma das metodologias empregadas para a diminuição do hidrogênio difusível no metal de solda. Esta estratégia permite limitar a difusão do hidrogênio no metal suscetível e diminuir a sua fragilização mediante a formação de armadilhas para capturar o hidrogênio (FATTAHI et al., 2016; MAROEF et al., 2002). Adicionalmente, elementos que são agregados na composição química dos eletrodos, podem reagir diminuindo a pressão parcial do hidrogênio na atmosfera do arco, influenciando no teor de Hidrogênio difusível no metal de solda (MATSUSHITA e LIU, 2000).

POPE e LIU (1996) estudaram o hidrogênio difusível em soldas úmidas depositadas por eletrodos oxidantes e rufílicos. Os autores realizaram a adição sistemática de hematita ao revestimento do eletrodo revestido com o intuito de analisar a sua influência na atmosfera do arco. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos pelos autores, onde se pode observar que a adição de hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ao revestimento do eletrodo reduziu significativamente o hidrogênio difusível em soldas úmidas. De acordo com os autores, os eletrodos oxidantes apresentaram os menores valores de hidrogênio total (difusível + residual). Esse hidrogênio total medido representa a quantidade de hidrogênio presente no metal de solda logo após a solda ter esfriado até a temperatura ambiente. Portanto, é possível supor que o menor hidrogênio difusível 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. Adicionalmente, 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). É possível que o hidrogênio reaja com o oxigênio na monocamada de íons  $\text{Fe}^{+2} \text{O}^{-2}$ , reduzindo a absorção de hidrogênio.

Tabela 1 – Hidrogênio difusível e residual no metal de solda de eletrodos rutilicos e com adição de hematita (oxidantes)

| Eletrodo  | Hidrogênio difusível | Hidrogênio Residual |
|---|----------------------|---------------------|
| A (50% TiO <sub>2</sub> )                       | 92,3±8,6             | 4,1±1,9             |
| B (20% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )         | 43,9±9,8             | 2,9±0,7             |
| C (30% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )         | 42,4±3,6             | 4,9±0,4             |
| D (50% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )         | 39,8±1,8             | 4,2±1,9             |
| E (20% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 10%MgO) | 51,3±15,5            | 4,3±0,4             |
| F (Oxidante 2%Ni)                               | 44,9±5,1             | 4,4±1,5             |
| G (E6013)                                       | 99,5±2,5             | 2,8±1,2             |

Fonte: POPE e LIU (1996)

Em relação aos eletrodos oxidantes, os experimentos realizados por BRACARENSE et al. (2009a), permitiram a caracterização microestrutural, análise e quantificação de inclusões, composição química do metal de solda, dureza Vickers, hidrogênio difusível e avaliação da soldabilidade para metais de solda obtidos a partir da utilização de eletrodos revestidos a 0,5 m de profundidade. Os resultados obtidos para o hidrogênio difusível, apresentados na Tabela 2, mostram que o eletrodo oxidante testado (Eletrodo A) é capaz de produzir soldas com baixo teor e, portanto, menos suscetíveis ao aparecimento de trincas a frio, tanto no metal de solda quanto na ZTA do metal de base (SANTOS et al., 2022). Nesse contexto, SANTOS et al. (2012) descreveram o desenvolvimento experimental de um eletrodo rutilico oxidante 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. Para isso, dezoito lotes de eletrodos foram produzidos em instalações industriais. Além disso, foram adicionados níquel e molibdênio para fortalecer o metal de solda. A maioria dos testes de soldagem foi realizada por simulações de laboratório e por mergulhadores no mar a uma profundidade de 10 m para obter a qualificação até 20 m de acordo com a norma AWS D3.6M: 2010. Como resultado, o teor de hidrogênio difusível de aproximadamente 20 ml/100 g foi alcançado no desenvolvimento de eletrodos do tipo rutilico oxidante, sendo aproximadamente equivalente ao teor de eletrodos oxidantes típicos e consideravelmente menor do que o teor típico de eletrodos do tipo rutilico. Consequentemente, obteve-se baixa porosidade e ausência de micro trincas no metal de solda, além de melhor operabilidade em relação ao eletrodo oxidante comercial. Também, os eletrodos aqui

desenvolvidos apresentaram menor porosidade e desempenho superior em termos de tenacidade (energia Charpy) e ductilidade (alongamento).

Tabela 2 – Hidrogênio difusível em eletrodo oxidante (A) e eletrodos rutilicos (E, D, B, C)

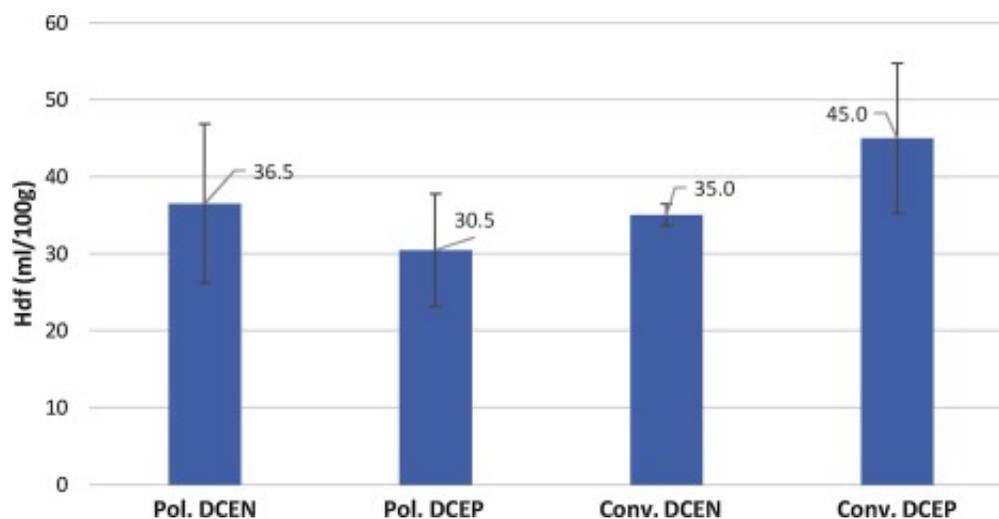
| Eletrodo | Hidrogênio difusível (mL/100 g) |       |      |      | Média | Desvio padrão |
|----------|---------------------------------|-------|------|------|-------|---------------|
| A        | 18.7                            | 24.5  | 18.1 | -    | 20.43 | 3.53          |
| E        | 98.8                            | 101.4 | 91.4 | -    | 97.20 | 5.19          |
| D        | 96.8                            | 100.9 | 68.5 | -    | 88.73 | 17.64         |
| B        | 84.8                            | 87.9  | 89.7 | -    | 87.43 | 2.47          |
| C        | 85.1                            | 105.2 | 72.3 | 78.9 | 85.38 | 14.21         |

Fonte: BRACARENSE et al. (2009a)

RIBEIRO-MENEZES et al. (2019) compararam eletrodos básicos envernizados convencionalmente e com polímero na soldagem subaquática molhada a uma profundidade simulada de 10 m. Um tanque hiperbárico foi usado para simulação de profundidade e um dispositivo de soldagem por gravidade foi usado para fazer o cordão de solda na posição plana. As soldas foram depositadas com correntes de soldagem de 100, 120, 140, 140, 160 e 180 A nas polaridades eletrodo negativo de corrente contínua (DCEN) e eletrodo positivo de corrente contínua (DCEP) para avaliar a estabilidade do arco por meio de um índice estatístico. O nível de corrente de soldagem que apresentou um melhor nível de estabilidade em ambas as polaridades foi escolhido para avaliar a morfologia do cordão de solda, a porosidade do metal de solda, o oxigênio do metal de solda e os níveis de hidrogênio difusível.

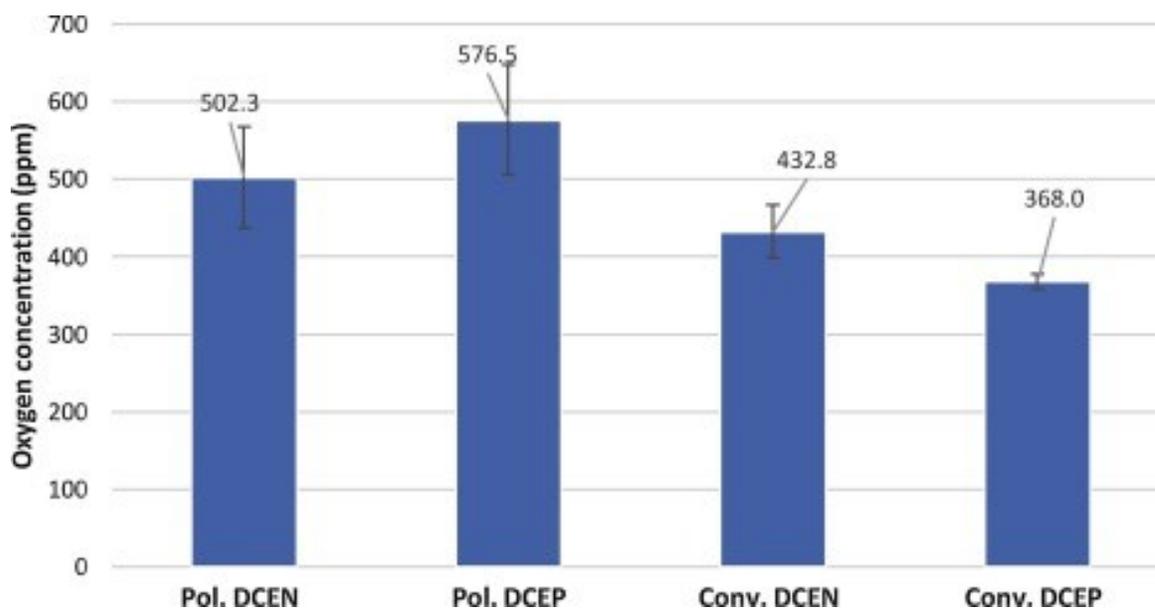
A Figura 4 mostra que o menor índice de hidrogênio difusível foi encontrado para o eletrodo com polímero na polaridade DCEP (30,5 ml / 100 g de metal depositado), que apresentou a maior quantidade de oxigênio (Figura 5). O valor mais alto foi encontrado para o eletrodo convencional na polaridade DCEP (45 ml / 100 g de metal depositado), que apresentou os menores valores de oxigênio. O eletrodo com polímero na polaridade DCEN e o eletrodo convencional na polaridade DCEN obtiveram valores intermediários e muito próximos.

Figura 4 - Hidrogênio difusível no metal de solda depositado com eletrodos com polímero (pol) e convencionais (Conv) nas duas polaridades (DCEP e DCEN)



Fonte: RIBEIRO-MENEZES et al. (2019)

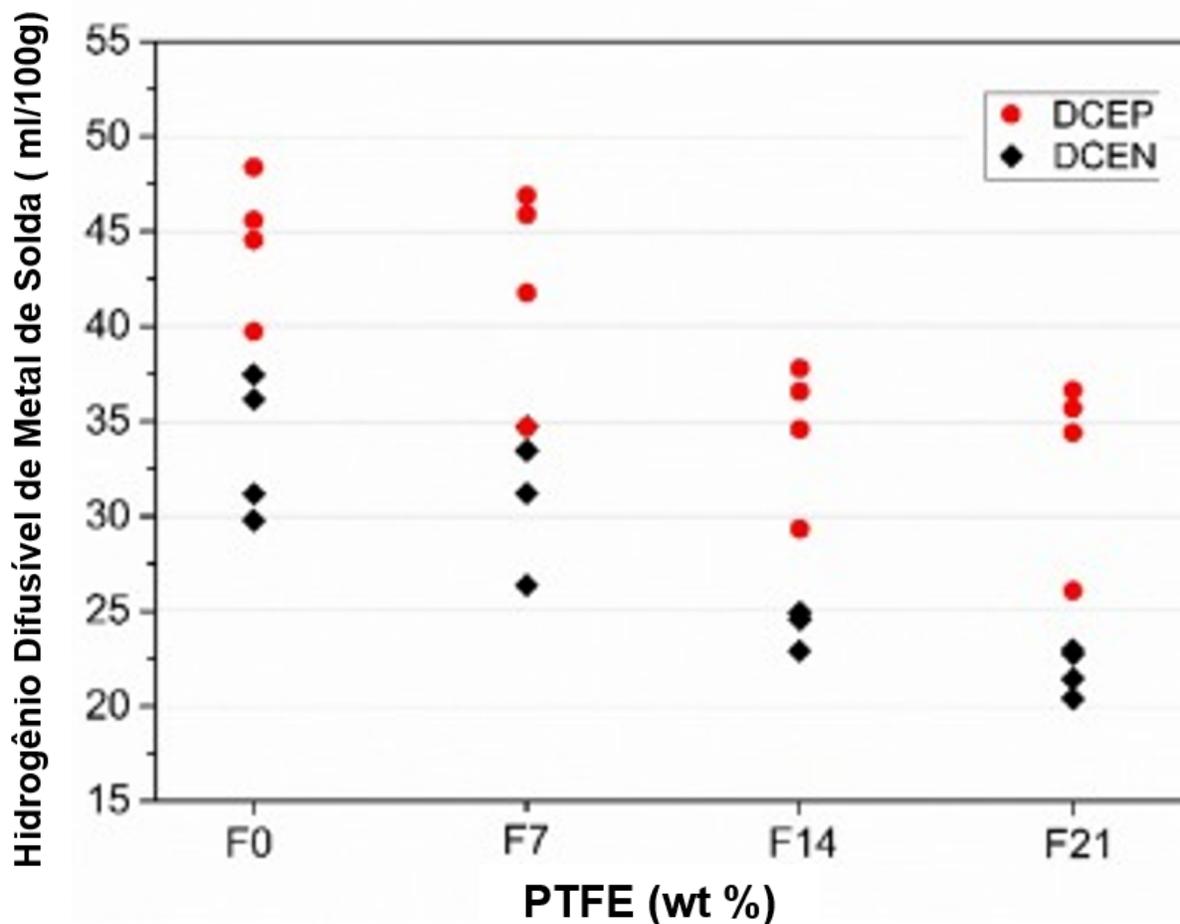
Figura 5 - Teor de oxigênio no metal de solda depositado com eletrodos com polímero (pol) e convencionais (Conv) nas duas polaridades (DCEP e DCEN)



Fonte: RIBEIRO-MENEZES et al. (2019)

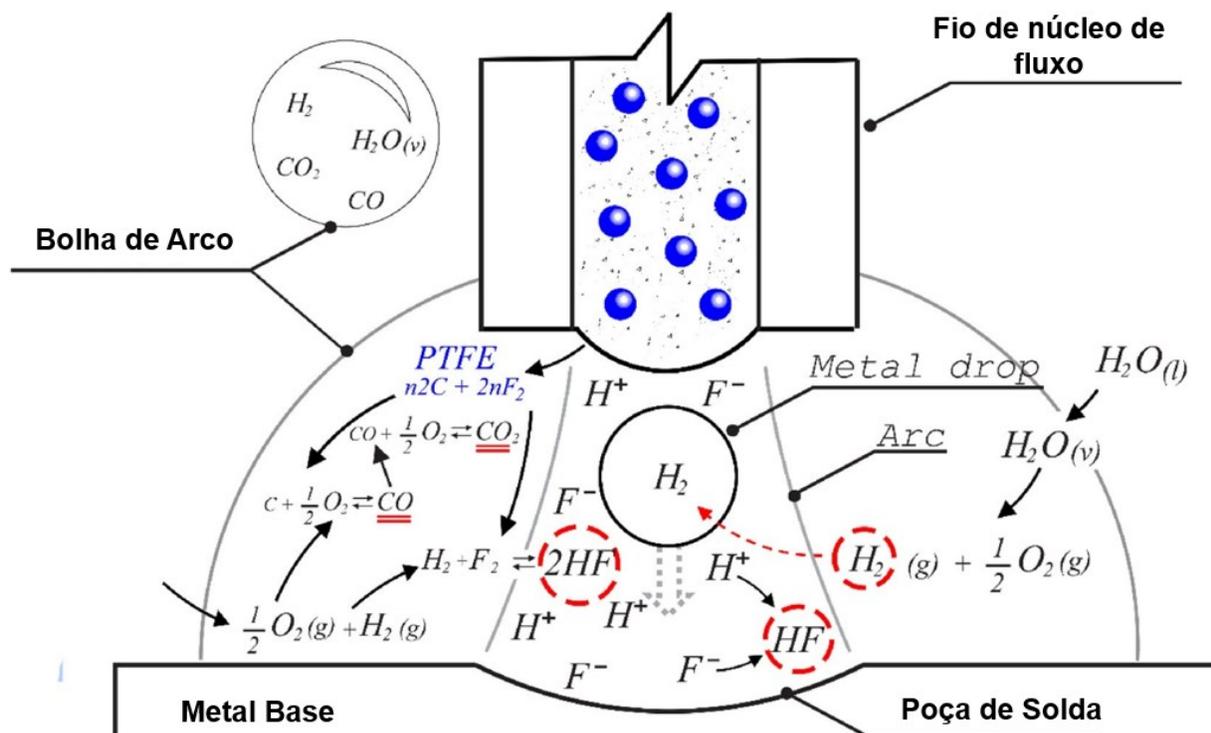
CAMPOS et. al (2021), estudaram o efeito da adição de PTFE em arames tubulares autoprotetidos utilizados na soldagem subaquática molhada em 0,5 m de profundidade. Como pode ser visto na Figura 6, o aumento de PTFE na composição química do fluxo diminuiu o hidrogênio difusível no metal de solda em ambas as polaridades. Como é explicado pelos autores, a quebra da molécula do PTFE ( $C_2F_4$ ) e sua reação com o  $H_2$  reduziu a participação do hidrogênio na atmosfera do arco por meio da reação  $F_2 + H_2 \rightarrow 2 HF$  (Ver Figura 7). Da mesma maneira, PLESSIS e TOIT (2008) consideram que a adição de compostos contendo flúor ao fluxo do eletrodo é um dos métodos mais eficazes para controlar o teor de hidrogênio difusível e melhorar as propriedades mecânicas da junta (DEEPAK et al., 2016).

Figura 6 - Relação entre a porcentagem em peso de PTFE e o hidrogênio difusível no metal de solda



Fonte: CAMPOS et. al (2021)

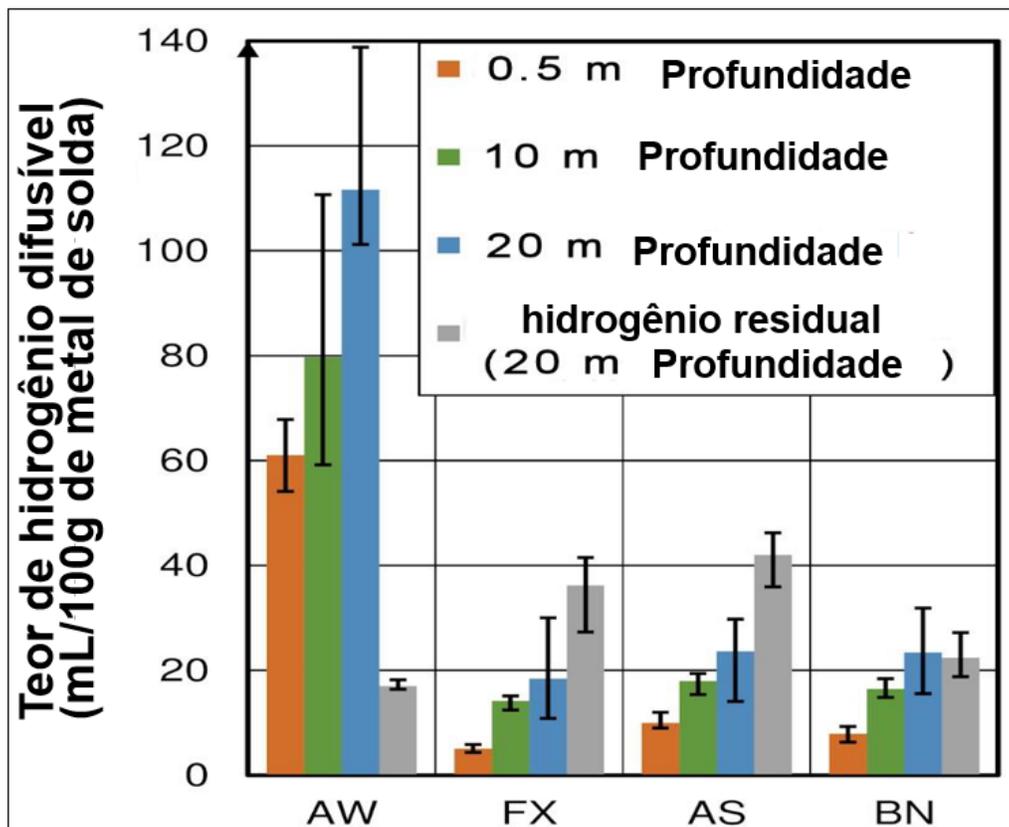
Figura 7 - Reação química na atmosfera do arco para o arame tubular com adição de PTFE



Fonte: adaptado de CAMPOS et. al (2021)

Klett e Hassel (2020) realizaram o processo de soldagem com eletrodo revestido em diferentes pressões, simulando profundidades de água de 0,5 m, 10 m e 20 m. Conforme mostrado na Figura 8, em todas as profundidades, o uso de metal de solda austenítico resulta em uma redução do teor de hidrogênio difusível. A maior redução do teor de hidrogênio difusível pode ser obtida com o eletrodo austenítico FX. Uma redução de 92% (0,5 m), 82% (10 m) e 85% (20 m) do hidrogênio difusível foi medida em comparação com a soldagem com o eletrodo ferrítico AW. À 0,5 m de profundidade da água, o teor médio de hidrogênio difusível de todas as soldas austeníticas é inferior a 10 ml/100 g de metal de solda (Eletrodos FX, AS e BN). Em 10 m de profundidade de água, são alcançadas médias abaixo de 20 ml/100 g de metal de solda e, em 20 m de profundidade de água, abaixo de 25 ml/100 g no metal de solda.

Figura 8 - Hidrogênio difusível e residual no metal de solda de cordões depositados com eletrodos ferrítico e austeníticos.



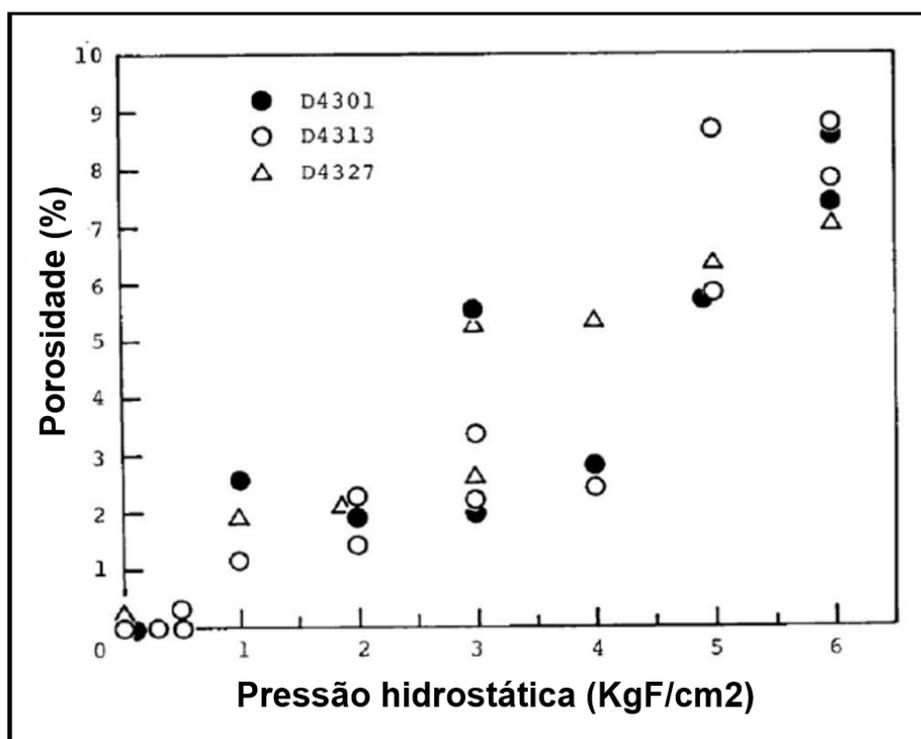
Fonte: Adaptado de Klett e Hassel (2020)

### 2.2.2 Porosidade

A porosidade no metal de solda é um dos defeitos mais comuns em todos os processos de soldagem, sendo um dos principais problemas na soldagem subaquática molhada. Segundo SANCHEZ-OSIO et al. (1993), a porosidade causa a redução da tenacidade, da ductilidade e da resistência ao escoamento do metal de solda. Estudos realizados estabelecem que na soldagem subaquática molhada, a pressão hidrostática e a porosidade são diretamente proporcionais, com poros aparecendo a partir de uma profundidade de 5 m, conforme mostrado na Figura 9. No entanto, SUGA e HASUI (1986) também relatam que a ausência de porosidade em soldas realizadas 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 (SUGA e HASUI, 1988). Segundo PESSOA et al. (2006), as propriedades mecânicas das soldas subaquáticas

molhadas dependem fortemente da profundidade da água e da perda dos elementos de liga devido ao aumento da oxidação e da porosidade. Nesse sentido, uma vez que as reações químicas do oxigênio e hidrogênio na poça de fusão líquida aumentam com a pressão da água, a presença crescente de oxigênio levará à redução da temperabilidade do metal de solda e à formação de microestrutura grossa contendo ferrita de contorno de grão. Conseqüentemente, é esperado o deterioro das propriedades mecânicas. Além disso, altas quantidades de hidrogênio na poça de fusão promovem o aumento da porosidade no metal de solda, resultando na redução da seção transversal de suporte de carga efetiva das amostras de teste de tração, resultando na diminuição do escoamento e dos limites de resistência final e alongamento.

Figura 9 - Efeito da profundidade na porosidade



Fonte: Adaptado de SUGA e HASUI (1986)

SHI et al. (2017), estudaram o efeito dos parâmetros do processo na porosidade (Ver Tabela 3). Para isso, realizaram a soldagem de um aço inoxidável duplex S32101 dentro de uma câmara hiperbárica, simulando duas profundidades de trabalho (20 m e 60 m). A porosidade média ( $\delta$ ) dos cordões de solda são mostradas na Figura 9. Pode-se observar que a o nível de porosidade das

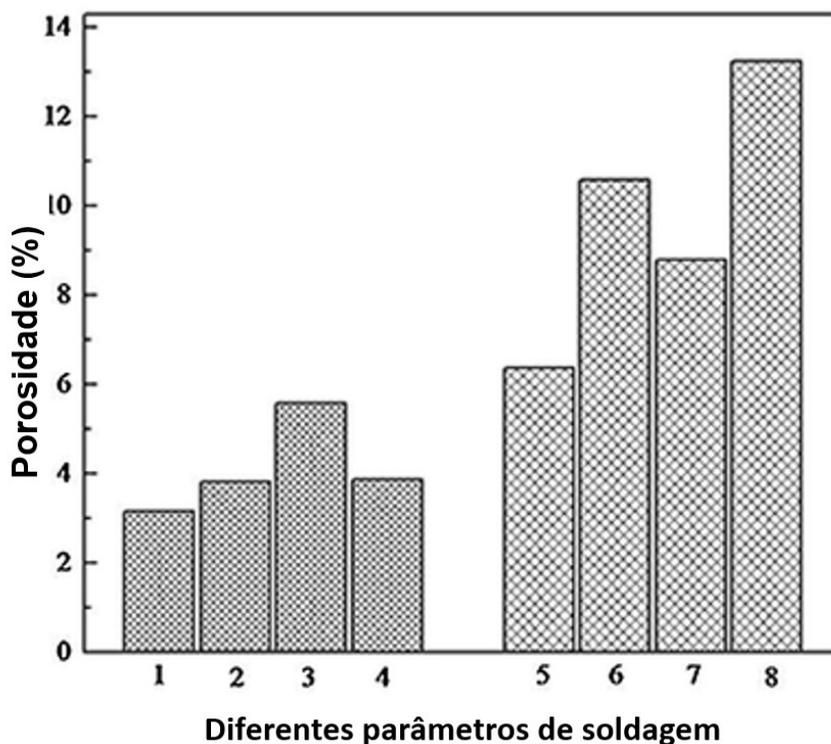
soldas em 20 m de profundidade é menor do que aquelas executadas em 60 m de profundidade de água. A faixa de porosidade em 60 m de profundidade de água está entre 6 e 14%, o que é quase duas vezes maior do que em 20 m de profundidade. Isso é atribuído principalmente ao aumento da pressão hidrostática. Assim como Silva apontou, o aumento da pressão hidrostática leva a uma queda do hidrogênio difusível, mas a um aumento da porosidade do metal de solda (DA SILVA, et al. 2012). Segundo BRACARENSE et al. (2009b) pode ser possível resolver este problema modificando a composição química do consumível, o que pode reduzir significativamente a porosidade, fornecendo oxigênio que pode aliviar a pressão do hidrogênio. Adicionalmente, comparando o teste nº 1 com o nº 2 e o nº 5 com o nº 6, pode-se corroborar que a porosidade em ambas as profundidades da água aumenta com tensão do arco, sendo o incremento de 21 e 67%, respectivamente. Da mesma forma, comparando o nº 3 com o nº 4 e o nº 6 com o nº 8, a velocidade de soldagem permite diminuir a porosidade em 31 e 20%, respectivamente. No entanto, ao diminuir a corrente de soldagem, a porosidade em 20 m aumenta em 46%, enquanto em 60 m se reduz em 17%. A diminuição da porosidade das soldas de 60 m de profundidade de água pode ser contribuída para a maior entrada de calor, o que permite mais tempo para o gás escapar, apesar da maior pressão hidrostática. Normalmente, o escape de gás precisa de tempo suficiente a uma determinada temperatura e, portanto, a poça de fusão é mais sensível à absorção de gases, o que não traz nenhum benefício para a redução da porosidade.

Tabela 3 – Parâmetros experimentais na soldagem de um aço inoxidável duplex S32101

| Teste | U (V) | I (A) | v (mm/s) | H (m) | Q (KJ/mm) | $\delta$ (%) |
|-------|-------|-------|----------|-------|-----------|--------------|
| 1     | 27    | 275   | 8,5      | 20    | 874       | 3,16         |
| 2     | 33    | 275   | 8,5      | 20    | 1068      | 3,81         |
| 3     | 33    | 225   | 8,5      | 20    | 874       | 5,58         |
| 4     | 33    | 225   | 5,5      | 20    | 1350      | 3,86         |
| 5     | 27    | 275   | 5,5      | 60    | 1350      | 6,36         |
| 6     | 33    | 275   | 5,5      | 60    | 1650      | 10,59        |
| 7     | 33    | 225   | 5,5      | 60    | 1350      | 8,78         |
| 8     | 33    | 275   | 8,5      | 60    | 1068      | 13,23        |

Fonte: SHI et al. (2017). U = Tensão do arco; I = Corrente; v = velocidade de soldagem, H = Profundidade, Q = Aporte térmica,  $\delta$  = nível de porosidade

Figura 10 - Efeito da profundidade na porosidade

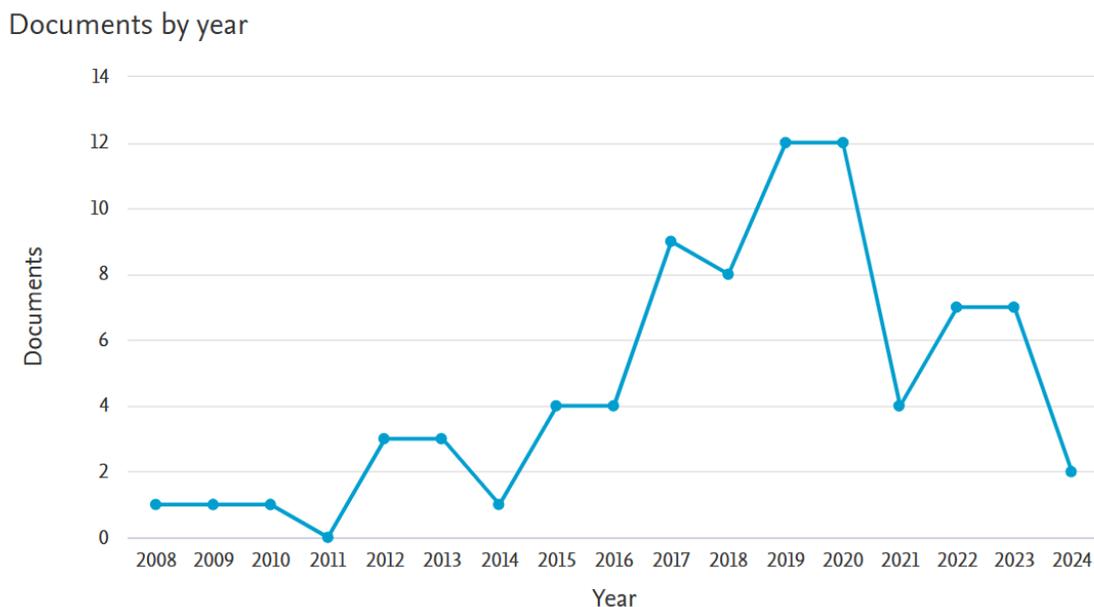


Fonte: SHI et al. (2017)

### 2.3 Soldagem subaquática molhada com arame tubular

Como é comentado por KLETT et al. (2020b), devido à não existência de equipamentos especiais que permitam a execução de soldagem molhada com arame tubular a nível industrial, o processo SMAW ainda é o mais utilizado. No entanto, segundo MORENO-URIBE e MODENESI, 2022, o processo FCAW em comparação com o SMAW apresenta maior produtividade e a possibilidade de automação. Estas duas características tornam o processo FCAW como uma técnica com um atrativo considerável para os centros de pesquisa da tecnologia de soldagem molhada no mundo. Como pode ser visto na Figura 11 Na base de dados Scopus com as palavras-chave (FCAW, SUMBARINE WELDING, AND FORMULATION), foram obtidos resultados que mostraram que ao longo do tempo tem se incrementado o interesse pelo estudo do desempenho operacional do uso do arame tubular como metal de aporte, sendo o instituto Harbin de tecnologia da China uns dos institutos com maior quantidade de publicações.

Figura 11- Quantidade de investigações realizadas sobre arame tubular na soldagem molhada nos últimos 16 anos.

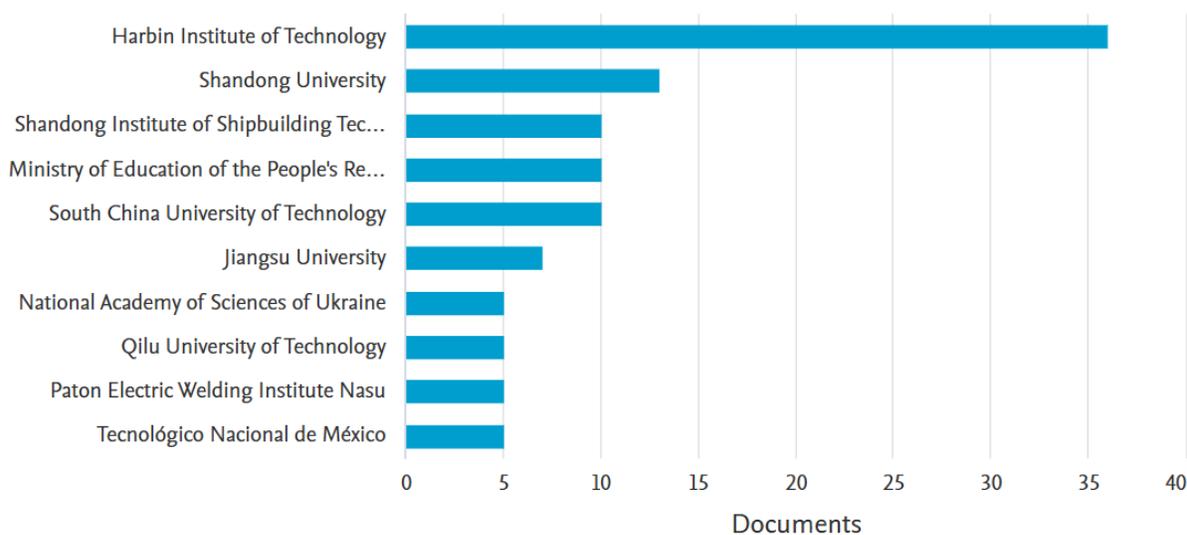


Fonte: SCOPUS, 2024

Figura 12 - Publicações sobre aplicação de arame tubular na soldagem molhada nos centros de investigação e institutos de soldagem

### Documents by affiliation

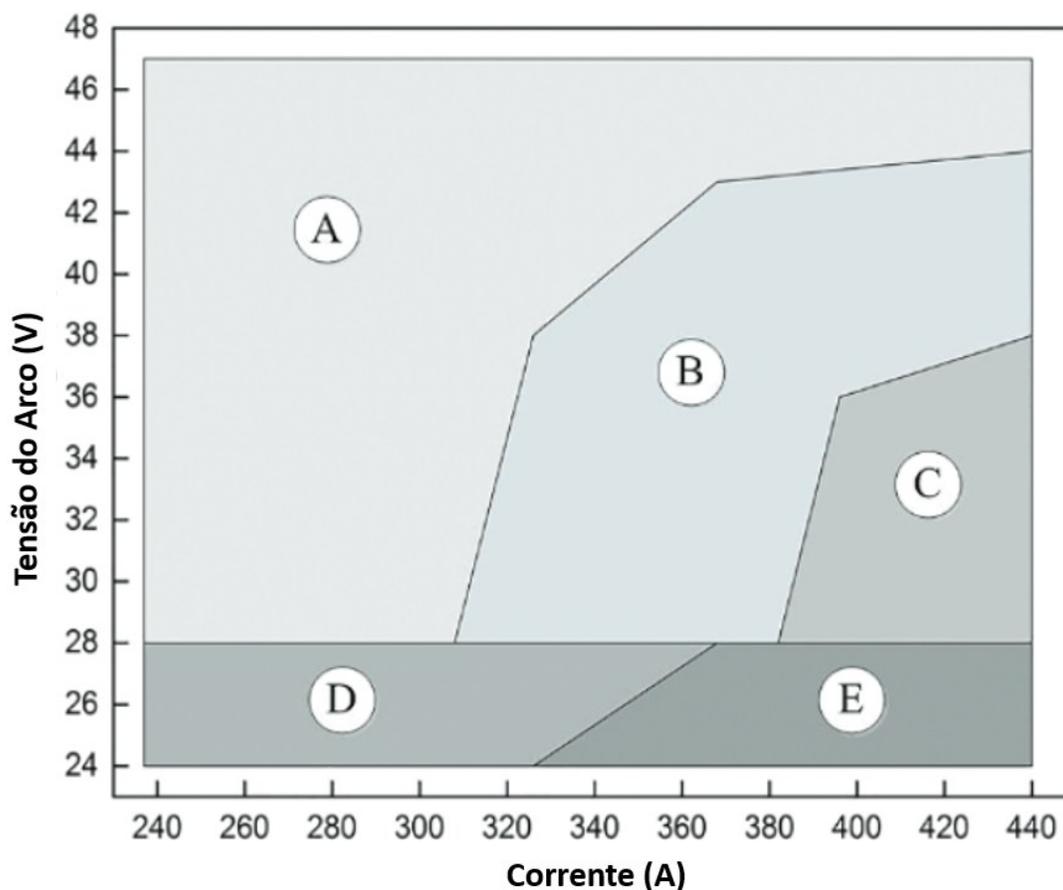
Compare the document counts for up to 15 affiliations.



Fonte: SCOPUS, 2024

Dentre as publicações realizadas nos últimos anos em relação a tecnologia de soldagem molhada com arame tubular, destaca-se o estudo da transferência metálica mediante diferentes técnicas. GUO et al. (2016), determinaram mediante o método de raios X que existem 4 tipos de transferência para faixas de 24 a 46 V de tensão do arco e 237 a 440 A de corrente, na soldagem molhada a 0,5 m de profundidade, tal como pode ser visto na Figura 13, sendo a transferência globular repelida, por tensão superficial, corto circuito explosivo e arco submerso.

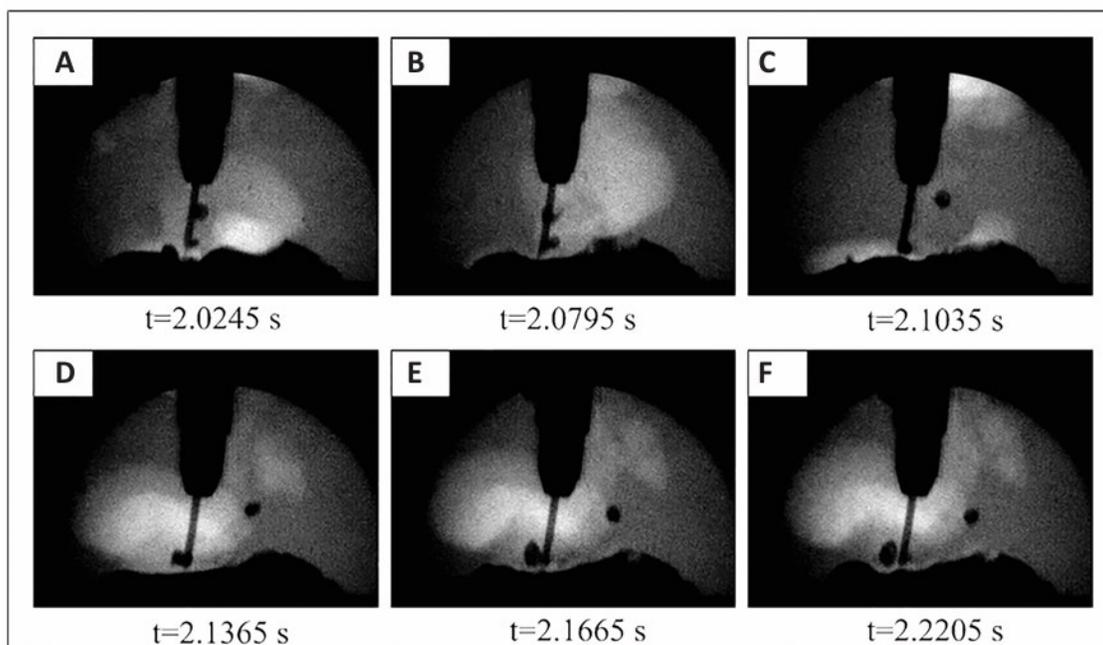
Figura 13 - Faixas de tensão do arco e corrente nas quais se evidenciam diferentes tipos de transferência metálica na soldagem molhada com arame tubular a 0,5 m de profundidade



Fonte: GUO et al. (2016). A - Modo de transferência globular repelida, modo de transferência por tensão superficial; B - modo de transferência globular repelida, modo de transferência por tensão superficial e “modo de transferência por arco submerso”; C - “modo de transferência por arco submerso”; D - modo de transferência por tensão superficial e “modo de transferência por arco submerso”; E - a soldagem não pôde ser realizada.

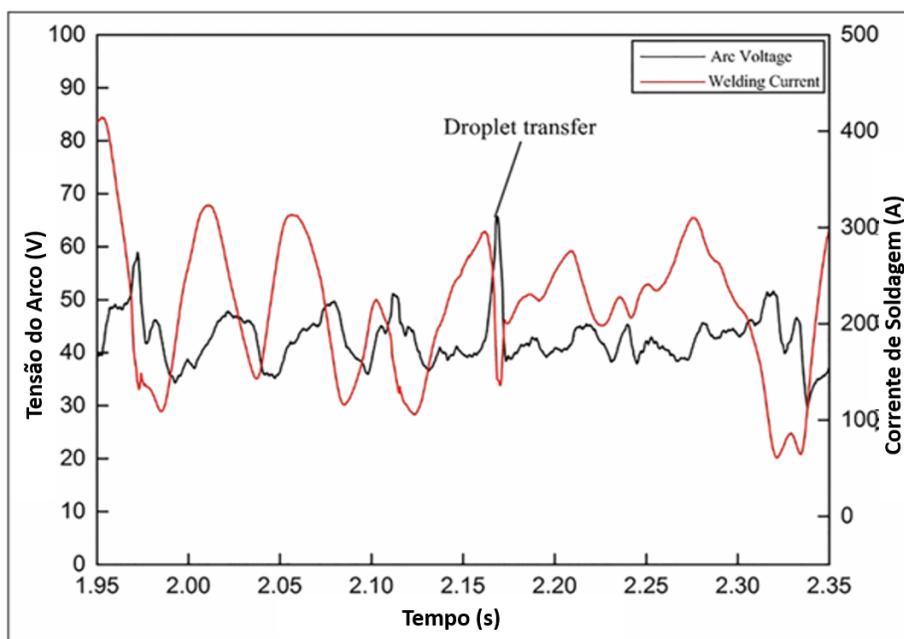
A Figura 14, apresenta um exemplo típico do modo de transferência globular repelida na soldagem subaquática molhada, comentada por GUO et al. (2016). Durante a transferência globular repelida, a gota formada a partir do metal fundido na ponta do arame cresce e gira em torno da ponta do arame. De 2,0245 a 2,1665 s, a gota passa por diferentes etapas: um aumento para cima, uma queda para baixo e uma rotação do lado direito do arame para o lado esquerdo. Quando a gota atinge seu tamanho máximo em 2,1665 s, ela se separa da ponta do arame sob a ação de seu próprio peso e é transferida para a poça de fusão, e a tensão do arco aumenta de 43,4 para 65,3 V. Enquanto isso, a corrente de soldagem diminui de 290,4 para 138,4 A, conforme mostrado na Figura 15. Segundo CASTELLANOS-GONZALEZ et al. (2022a) APUD GUO et al. (2017), a transferência globular repelida se pode dividir dependendo do ângulo de desprendimento formado entre o eixo do arame e a gota transferida, como em modo de transferência globular repelida por ângulo agudo e por ângulo obtuso. A Figura 16 mostra um esquema dos resultados experimentais de GUO et al (2017). Por um lado, durante o processo de transferência de metal (de 5,0595 s a 5,3025 s), a gota formada na ponta do eletrodo é violentamente repelida do eixo do arame pelas forças repulsivas e gira em torno da ponta devido à variação das forças gravitacionais e repulsivas. Quando a gota atinge seu tamanho máximo, ela se desprende da ponta do arame sob a ação de forças repulsivas que aumentam em 5,3025 s, com um ângulo de desprendimento maior que  $90^\circ$ . Enquanto isso, a tensão do arco aumenta de 38,2 V para 42,4 V e a corrente de soldagem diminui de 172,1 A para 101,4 A. A gota fundida é repetidamente repelida durante sua formação e os sinais elétricos oscilam consideravelmente, indicando a baixa estabilidade desse processo de transferência metálica. Por outro lado, de 8,6290 s a 8,7955 s, a gota crescente repelida pelas forças repulsivas passa por diferentes estágios: subida e descida, semelhante ao observado na transferência globular repelida por ângulo obtuso (Ver Figura 17). Em 8,7955 s, a gota que atinge seu tamanho máximo se separa da ponta do arame sob a ação da gravidade e o ângulo de desprendimento é menor que  $90^\circ$ . Depois que a gota é transferida para a poça de solda, a tensão do arco aumenta de 37,1 V para 38,2 V e a corrente de soldagem diminui de 219,7 A para 205,3 A.

Figura 14 - Esquema que representa a transferência globular repelida



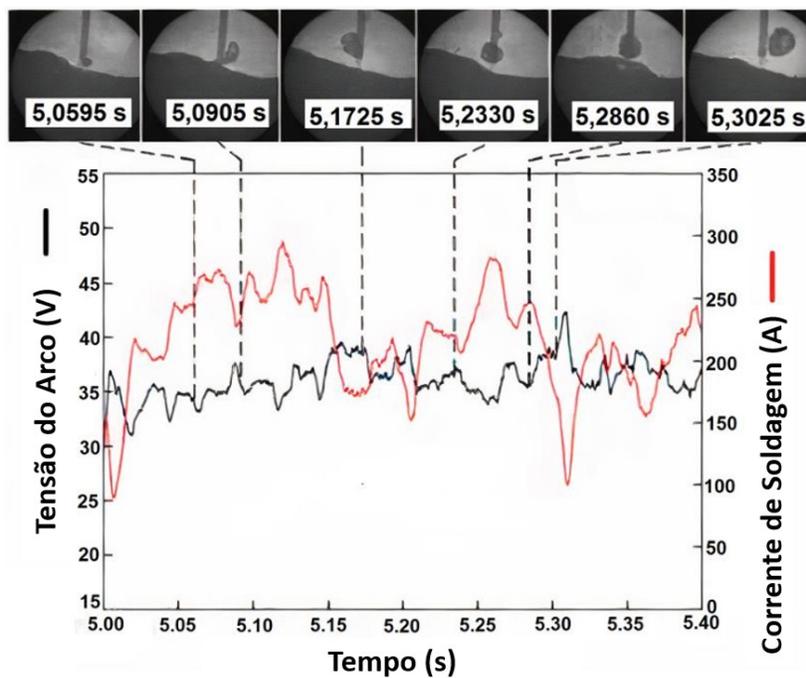
Fonte: GUO et al. (2016).

Figura 15 - Oscilograma de tensão do arco e corrente de soldagem onde acontece transferência globular repelida



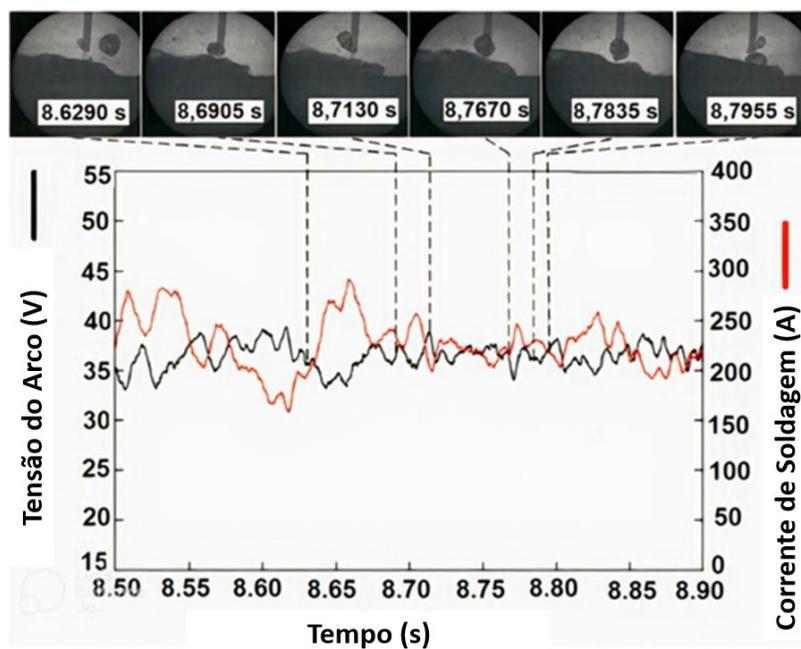
Fonte: GUO et al. (2016).

Figura 16 - Oscilograma de tensão do arco e corrente de soldagem onde acontece transferência globular repelida por ângulo obtuso (ângulo de desprendimento maior que  $90^\circ$ )



Fonte: GUO et al. (2017).

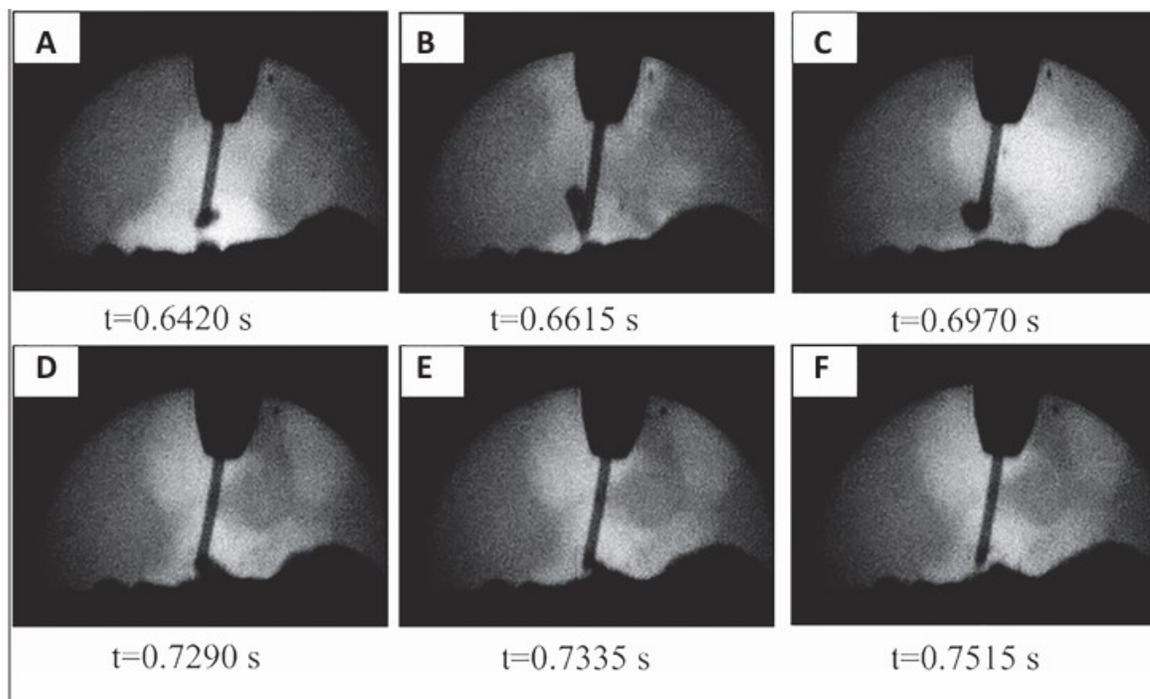
Figura 17 - Oscilograma de tensão do arco e corrente de soldagem onde acontece transferência globular repelida por ângulo agudo (ângulo de desprendimento menor que  $90^\circ$ )



Fonte: GUO et al. (2017).

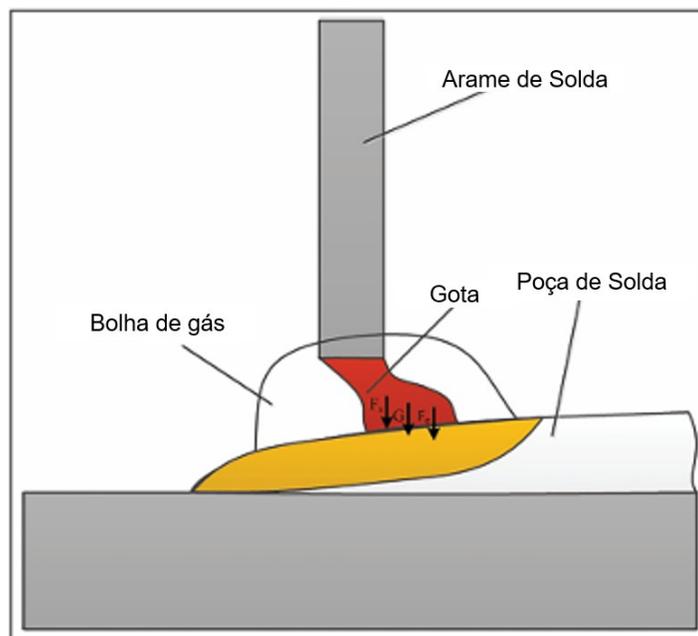
Na Figura 18 pode-se evidenciar a transferência por tensão superficial comentada por GUO et al. (2016). De 0,6420 a 0,7290 s, a gota se forma na ponta do arame, semelhante ao modo de transferência globular repelida. À medida que a gota cresce, ela preenche a lacuna entre a ponta do arame e a poça de fusão e, finalmente, entra em contato com a poça de fusão aos 0,7290 s, criando uma ponte líquida. A tensão superficial ( $F_s$ ) e a força eletromagnética ( $F_e$ ) surgem entre a gota e a poça de fusão, o que acelera a transferência da gota, conforme mostrado na Figura 19. Conforme a Figura 20, o processo de transferência de metal entrou então no estágio de curto circuito. Quando a gota entrou em contato com a superfície da poça de fusão, a tensão do arco caiu de 35,9 para 12,6 V e a corrente de soldagem aumentou rapidamente de 49,1 para 416,2 A. De 0,7290 a 0,7515 s, um estrangulamento emergiu da ponte líquida sob a ação combinada da tensão superficial e da força eletromagnética entre a gota e a poça de fusão; esse é o estágio de transferência de tensão superficial, que é característico do modo de transferência de tensão superficial. Em 0,7515 s, se interrompe a ponte líquida e a gota foi finalmente transferida para a poça de fusão.

Figura 18 - Esquema que representa a transferência globular por tensão superficial



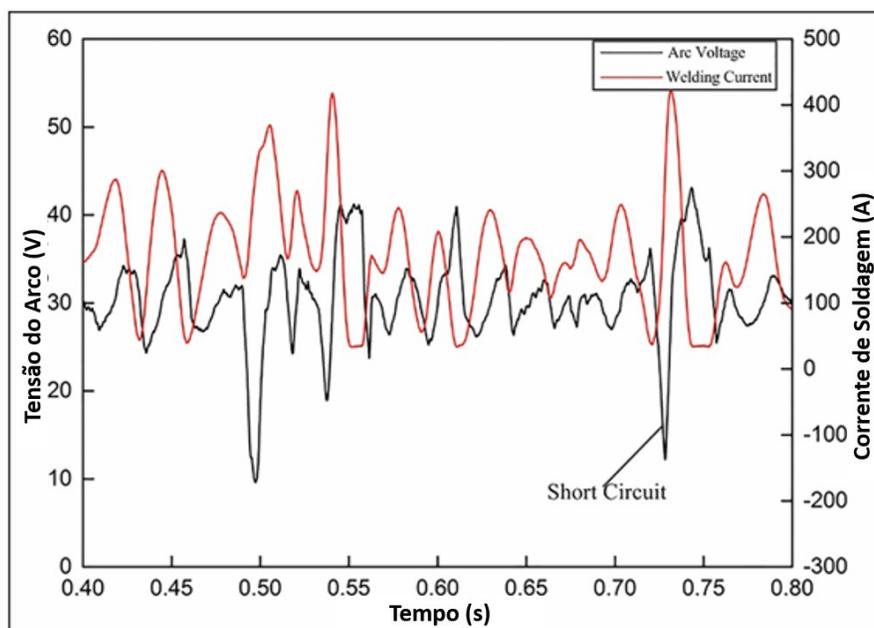
Fonte: GUO et al. (2016).

Figura 19 - Forças envolvidas na transferência globular por tensão superficial e curto circuito explosivo



Fonte: GUO et al. (2016).

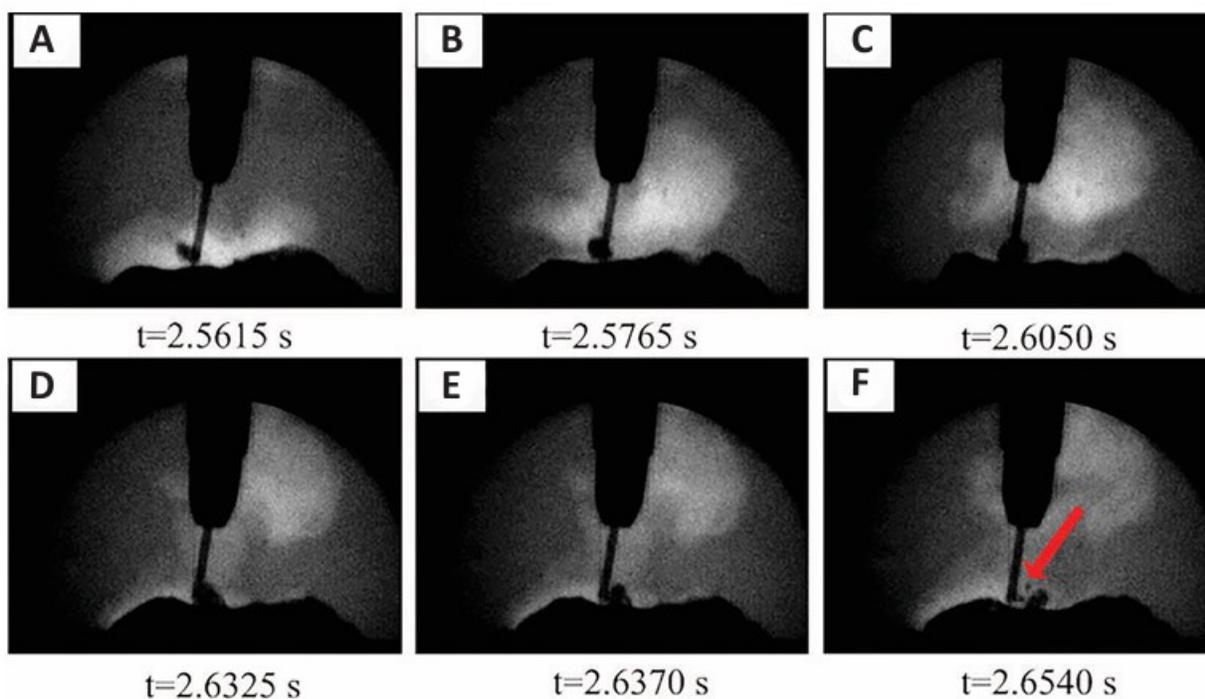
Figura 20 - Oscilograma de tensão do arco e corrente de soldagem onde acontece transferência por tensão superficial



Fonte: GUO et al. (2016).

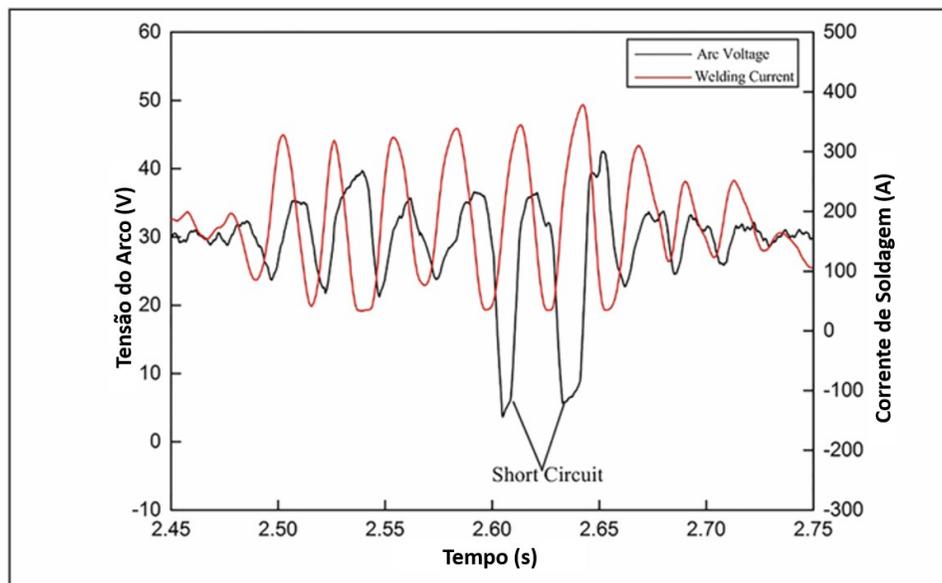
Na Figura 21 pode-se evidenciar a transferência por curto circuito explosivo comentada por GUO et al. (2016). De 2,5615 a 2,6050 s, o processo de transferência de metal é semelhante ao modo de transferência globular repelido, no qual a gota crescente é repelida do eixo do arame. Aos 2,6050 s, a gota entra em contato com a poça de fusão acontecendo o curto circuito, no qual uma ponte líquida foi criada, e a tensão superficial ( $F_s$ ) e a força eletromagnética ( $F_e$ ), conforme mostrado na Figura 19. De 2,6050 a 2,6325 s, não tem estrangulamento na ponte líquida, e a gota não é transferida diretamente para a poça de fusão sob o efeito combinado da força eletromagnética e da força de tensão superficial. O oscilograma do sinal elétrico desse processo de transferência é mostrado na Figura 22. Quando a gota entra em contato com a poça de fusão em 2,6050 e 2,6325 s, a corrente de soldagem aumenta de 35,6 para 339,1 A e de 39,4 para 377,6 A, respectivamente. Em 2,6450 s, a ponte líquida explode devido ao aumento da corrente de soldagem ou à reação metalúrgica interna, gerando respingos explosivos e fazendo com que a gota seja repelida violentamente fora da poça de fusão ao mesmo tempo.

Figura 21 - Esquema que representa a transferência por curto circuito explosivo



Fonte: GUO et al. (2016).

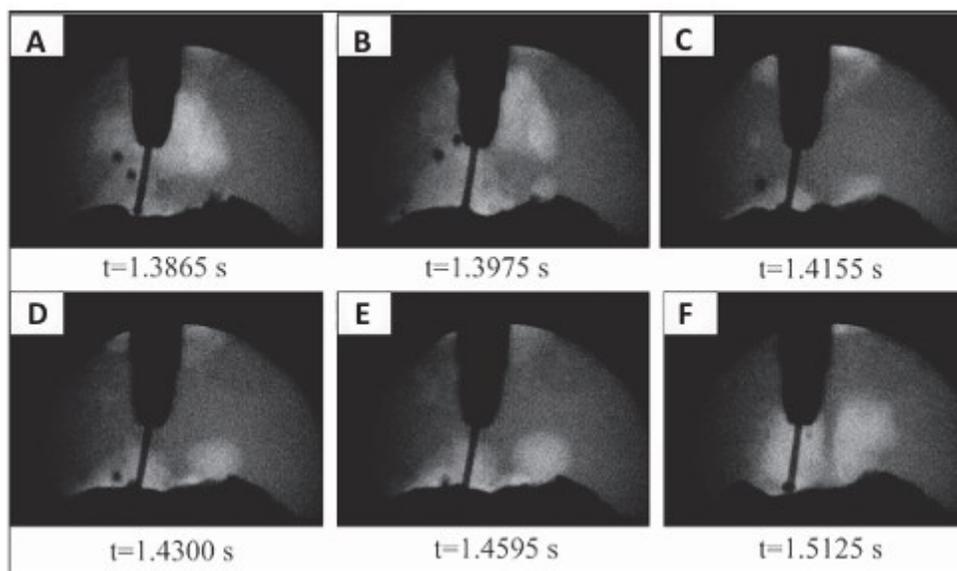
Figura 22 - Oscilograma de tensão do arco e corrente de soldagem onde acontece transferência por curto circuito explosivo.



Fonte: GUO et al. (2016).

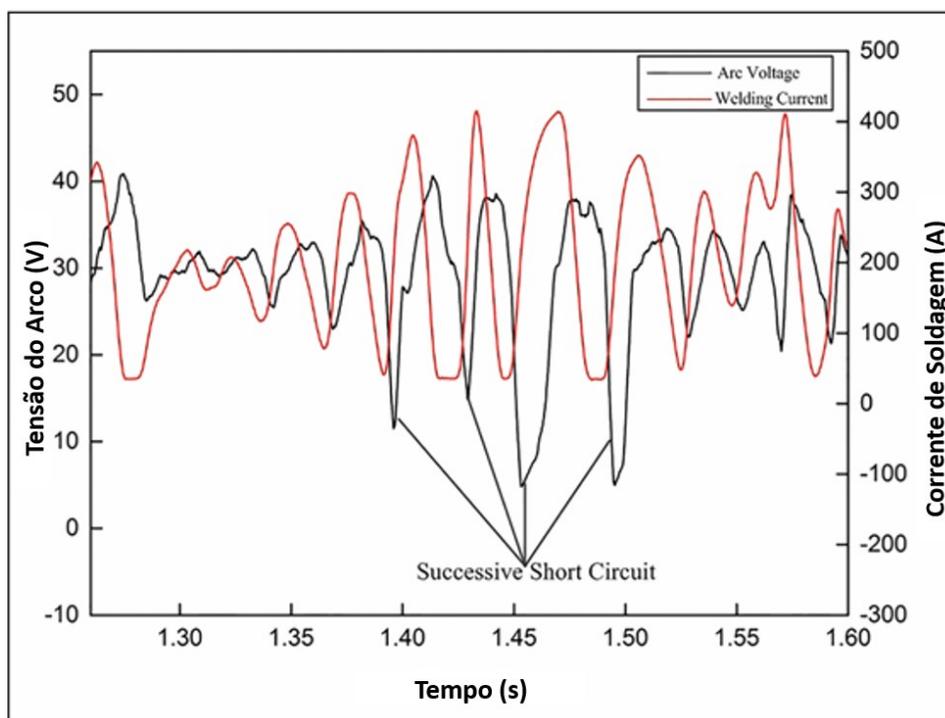
Devido ao efeito da força do arco na superfície da poça fundida, o metal líquido é deslocado e uma cavidade se forma diretamente abaixo do arco. Conseqüentemente, quando o comprimento do arco fica mais curto, a ponta do arame entra nessa cavidade. Assim, o processo de transferência de metal não pôde ser observado claramente nas imagens de transferência. Esse fenômeno de transferência é chamado de “modo de transferência por arco submerso”. As imagens de transferência desse processo são mostradas na Figura 23. No início do processo de transferência (de 1,3865 a 1,3975 s), o arame sólido se funde e entra na cavidade deprimida. De 1,3975 a 1,5125 s, o metal fundido é transferido diretamente para a poça de fusão, acontecendo o modo de transferência por arco submerso. Obviamente, um comprimento de arco mais curto é favorável para esse tipo de transferência metálica. O oscilograma do sinal elétrico do modo de transferência por arco submerso é mostrado na Figura 24; enquanto a ponta do arame entra na cavidade deprimida, a gota entra em contato com a poça de fusão facilmente e ocorre um fenômeno de curto circuito. fazendo com que a tensão do arco e a corrente de soldagem fltuem acentuadamente. Durante o processo de transferência desse modo, a poça de fusão gera facilmente explosões devido à corrente crescente que surge com frequência enquanto a ponta do arame entra na cavidade deprimida; isso dá origem a respingos explosivos e torna o processo de transferência instável.

Figura 23 - Esquema que representa a transferência por arco submerso



Fonte: GUO et al. (2016)

Figura 24 - Oscilograma de tensão do arco e corrente de soldagem onde acontece transferência por arco submerso.



Fonte: GUO et al. (2016).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

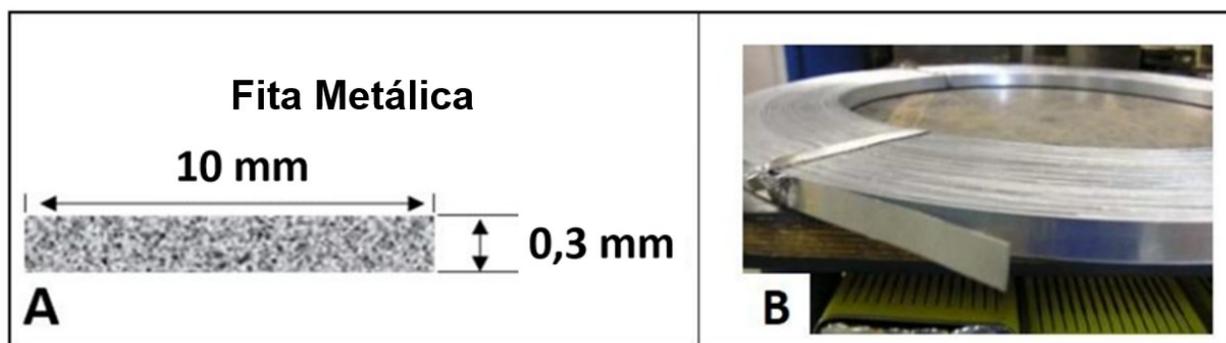
#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Arames tubulares experimentais e metal de base

Como mostrado na Figura 25, a bainha metálica dos arames tubulares foi fabricada utilizando uma fita de aço SAE 1006, com 10 mm de largura e 0,3 mm de espessura. Além da facilidade de conformação do aço SAE 1006, também foi selecionado devido a que foi empregado de maneira satisfatória para o desenvolvimento de arames tubulares em outros trabalhos de pesquisa (CAMPOS, 2021; CAMPOS et. al, 2021; CASTELLANOS-GONZALEZ et. al, 2021). A composição química da fita metálica pode ser visualizada na Tabela 4.

Adicionalmente, a Tabela 5 mostra a composição química dos fluxos utilizados na fabricação dos arames tubulares experimentais. Por um lado, o arame tubular N1 se destaca por ter uma porcentagem de 60% em peso de Níquel. Por outro lado, o arame tubular N2 tem uma quantidade de 70 g de níquel por cada 100 g de fluxo formulado. Além disso, o metal de base utilizado foram chapas de um aço ASTM AH36 de 19 mm de espessura. Este tipo de aço é comumente utilizado em estruturas navais e plataformas offshore. As dimensões das chapas e a composição química do metal de base podem ser visualizadas na Figura 26 e na Tabela 6, respectivamente.

Figura 25– Representação esquemática da fita metálica – (a) dimensões (b) rolo de fita



Fonte: Autor

Tabela 4. Composição química da fita metálica

| Elemento  | Fe   | Mn    | C      | Al     | Elementos residuais |
|-----------|------|-------|--------|--------|---------------------|
| % em peso | 99,5 | 0,225 | 0,0557 | 0,0229 | Balance             |

Fonte. Autor

Tabela 5. Composição química do fluxo dos arames tubulares autoprotetidos

| Elemento  | Tipo de arame tubular |      |
|---|-----------------------|------|
|   | N1                    | N2   |
| Ni  | 60 %                  | 70 % |
| TiO <sub>2</sub>  | 15 %                  | 15 % |
| Outros elementos (gerados de gás e escória, estabilizadores e ionizadores do arco, elementos de liga) | 25 %                  | 15 % |

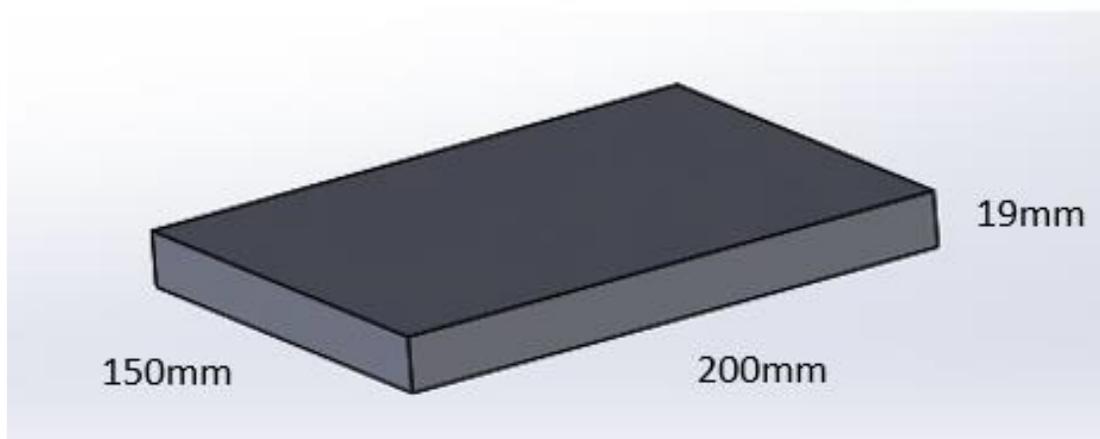
Fonte. Autor

Tabela 6. Composição química do metal de base

| 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. Autor

Figura 26 – Dimensões do metal de solda utilizado



Fonte: Autor

### 3.2 Metodologia e equipamentos

Nesta seção do trabalho será exposta a metodologia experimental que compreende a fabricação de arame tubular e os testes de soldagem ao ar, em 0,3 m e 30 m de profundidade (CAMPOS et. al, 2021). Além disso, será mostrada a metodologia utilizada na análise dos sinais elétricos e da morfologia do cordão de solda. Posteriormente, será exposto o método estatístico utilizado para a obtenção dos gráficos Boxplot que auxiliaram na compreensão dos resultados.

#### 3.2.1 Fabricação de arame tubular

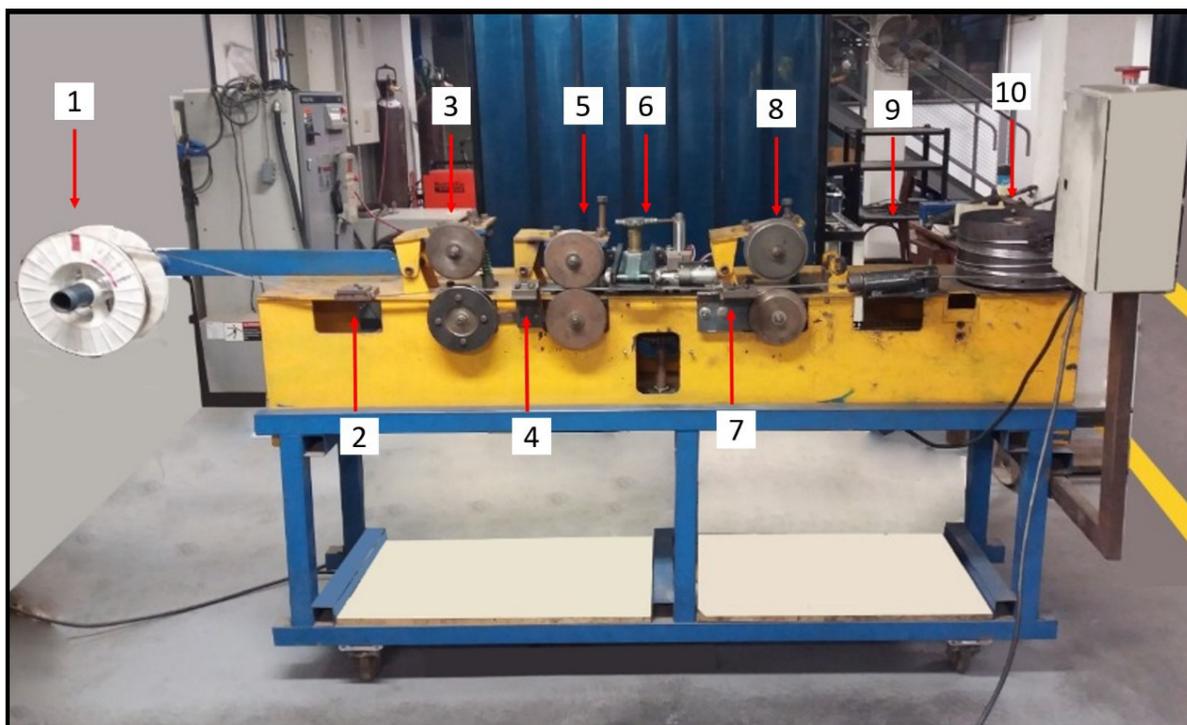
Uma vez preparados os fluxos mediante um divisor de Rifles com 16 Grelhas (Ver Figura 27), os dois arames tubulares autoprotelidos foram fabricados com o auxílio de uma máquina piloto, a qual foi desenvolvida no LRSS da UFMG (Ver Figura 28). A máquina está constituída por um tambor (Ver Figura 29), que traciona o arame para que possa ser conformado mediante três pares de roletes até um formato em U. Posteriormente, um dente raspador (Ver Figura 30), retira o excesso de fluxo para que a fieira possa realizar o fechamento em formato circular. Como pode ser visto na Tabela 7, cada fieira tem uma frequência ótima de operação para evitar que o arame se rompa durante a sua fabricação. Além disso, devido a que é um processo de conformação a frio, dentro da caixa de acoplamento das fieiras se utiliza grafite para realizar o lubrificado enquanto se realiza o trefilado do arame, desde o diâmetro inicial de 3,5 mm, até o diâmetro final de 1,6 mm.

Figura 27 – Divisor de Rifles com 16 grelhas



Fonte: Autor

Figura 28 – Máquina para fabricação de arame tubular



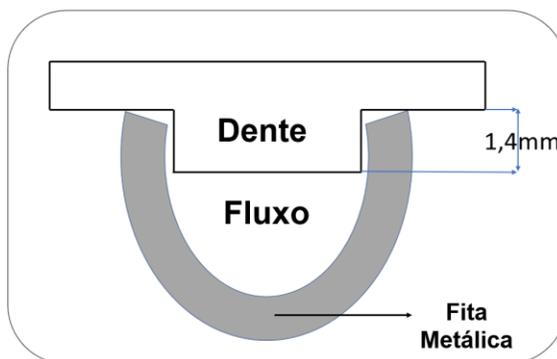
Fonte: CAMPOS, 2021. (1) carretel com a fita metálica, (3, 5 e 8) três pares de roletes de conformação nos formatos em “V” e “U” e de fechamento, respectivamente, (2, 4 e 7) guias de alinhamento da fita, (6) sistema de alimentação de fluxo, (9) caixa de acoplamento de feiras (9) e (10) tambor de tracionamento e bobinamento do arame.

Figura 29 – Tambor de tracionamento e bobinado do arame



Fonte: CAMPOS, 2021

Figura 30 – Dente raspador que retira o excesso de fluxo



Fonte: Autor

Tabela 7 – Relação da velocidade de trefilado

| Diâmetro da fieira (mm) | Frequência de trabalho (Hz) (66 Hz equivale a 1,18 m/min) |
|-------------------------|---|
| 3,5                     | 33  |
| 3,2                     | 32  |
| 2,9                     | 31  |
| 2,75                    | 30  |
| 2,6                     | 29  |
| 2,45                    | 27,5  |
| 2,3                     | 26  |
| 2,2                     | 25  |
| 2,0                     | 19  |
| 1,9                     | 18  |
| 1,8                     | 17  |
| 1,7                     | 16  |
| 1,6                     | 15  |

Fonte: Autor

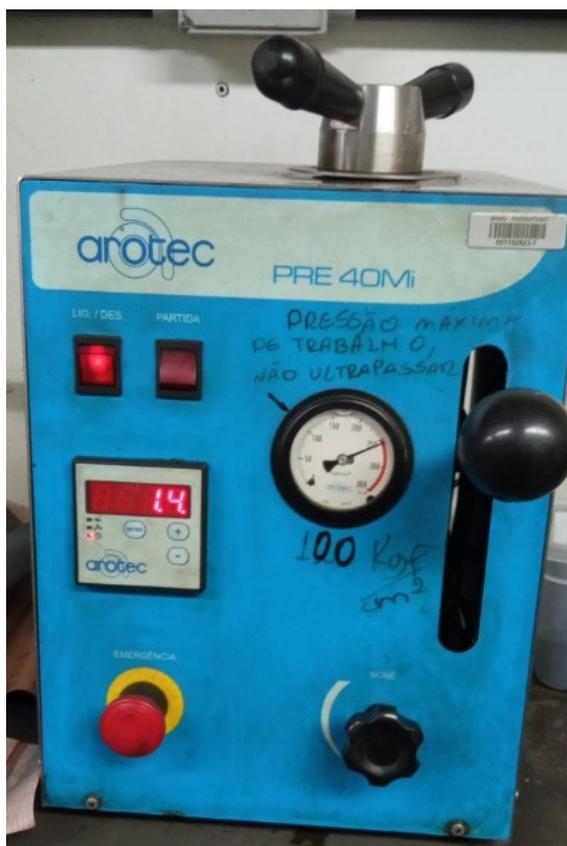
### 3.2.2 Caracterização do arame tubular fabricado

Nesta etapa, foi calculada a taxa de enchimento (porcentagem de fluxo), o diâmetro e tipo de fechamento dos arames. Por um lado, para o cálculo da porcentagem de fluxo, foram cortadas 5 amostras de 80 mm de comprimento em seções aleatórias dos arames tubulares fabricados, com

objetivo de validar a quantidade de fluxo, conforme é mostrado na Equação 1. Por outro lado, para verificar o tipo de fechamento do arame e mensurar o diâmetro, foram utilizadas seções de 10 mm de comprimento, as quais foram colocadas dentro de baquelite e preparadas em uma embutidora (Ver Figura 31). Posteriormente, a peça embutida foi lixada com o objetivo de visualizar a área transversal do arame, sendo analisada em um microscópio óptico modelo BX60M (Ver Figura 32), do fabricante OLYMPUS, equipado com uma câmera TOUPCAM TM UCMOS 03100KPA. Adicionalmente, com o auxílio do software Image J, foi possível medir o diâmetro da seção transversal dos arames fabricados.

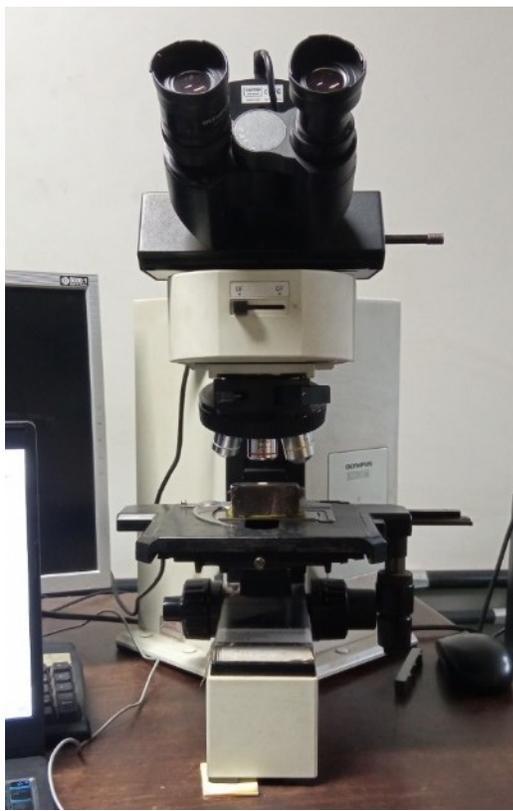
$$\text{Taxa de enchimento} = \frac{\text{massa do arame com fluxo} - \text{massa do arame sem fluxo}}{\text{massa do arame com fluxo}} \times 100 \quad (1)$$

Figura 31 – Embutidora



Fonte: Autor.

Figura 32 – Microscópio ótico

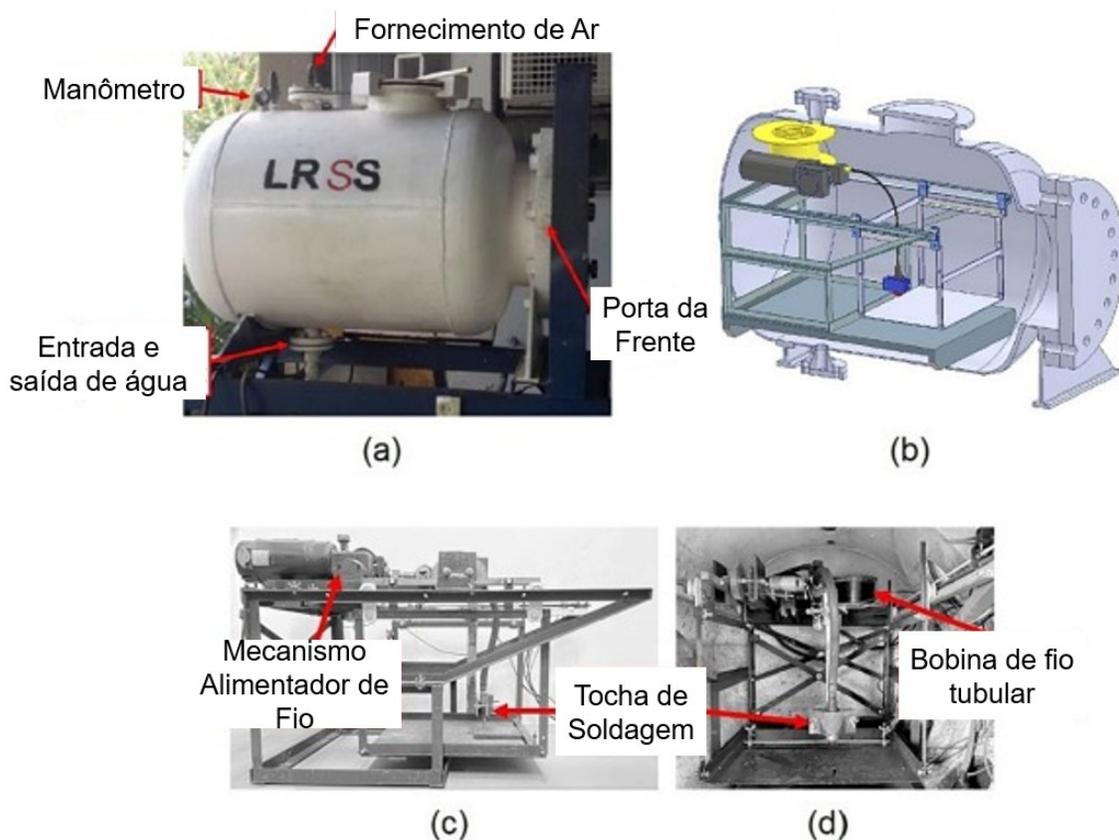


Fonte: Autor.

### 3.3 Produção dos cordões de solda

Os cordões de solda foram depositados na posição plana mediante o uso de uma câmara hiperbárica, a qual permite a simulação de soldagem atmosférica e mediante uma conexão a uma linha de suprimento de ar comprimido, permite simular soldagem molhada em diferentes profundidades. Adicionalmente, dentro da câmara hiperbárica, foi situado um dispositivo semiautomático uniaxial, que auxiliou no controle da velocidade de deslocamento do metal base e na alimentação do arame tubular. Além disso, permitiu manter a tocha de soldagem fixa em um ângulo de  $90^\circ$  em relação ao metal de base. O esquema de soldagem que foi projetado no trabalho de ASSUNÇÃO e BRACARENSE (2023), pode ser visualizado na Figura 33. Adicionalmente, todos os testes foram realizados com os parâmetros fixos expostos na Tabela 8, e com o auxílio de uma fonte de soldagem de tensão constante.

Figura 33 – Esquema que mostra a câmara hiperbárica e o dispositivo semiautomático uniaxial utilizado na deposição dos cordões de solda.



Fonte: ASSUNÇÃO e BRACARENSE (2023). (a) Câmara hiperbárica (b) Projeto em 3D do interior da câmara hiperbárica, (c) vista lateral esquerda do dispositivo semiautomático uniaxial e (d) vista frontal do dispositivo semiautomático uniaxial

Tabela 8 – Parâmetros fixos para todos os experimentos.

|  |           |
|--|-----------|
| Tensão do arco                             | 28 V      |
| Velocidade de alimentação do arame tubular | 4,4 m/min |
| Velocidade de soldagem                     | 25 cm/min |
| Stick-out                                  | 30 mm     |

Fonte: Autor.

### 3.4 Dados do experimento

#### 3.4.1 Análise de sinais elétricos

Os sinais de tensão do arco e corrente foram armazenados sincronamente à execução dos cordões de solda, a uma taxa de 5000 pontos por segundo, utilizando o sistema de aquisição SAP V4 da IMC Soldagem. Posteriormente, foram processados no software SINAL, sendo analisados 8 segundos dos eventos que aconteceram 3 segundos após o início do arco elétrico (Ver Figura 34). Como resultados, foram obtidos os valores da tensão do arco (V), corrente (I), desvio padrão da tensão do arco (DPU), desvio padrão da corrente (DPI) e potência (P). A partir do valor da potência, foi calculado o aporte térmico, segundo a equação 2 (DOS SANTOS et al., 2020). Além disso, similar ao realizado por ASSUNÇÃO (2018), o índice proposto para a caracterização da estabilidade foi o coeficiente de variação da corrente (KvI). O KvI foi obtido a partir da equação 3.

$$\text{Aporte térmico } Q \left( \frac{KJ}{mm} \right) = \frac{\text{Potência (W)}}{1000 * v \left( \frac{mm}{s} \right)} ; \text{ onde } v \text{ é a velocidade de soldagem} \quad (2)$$

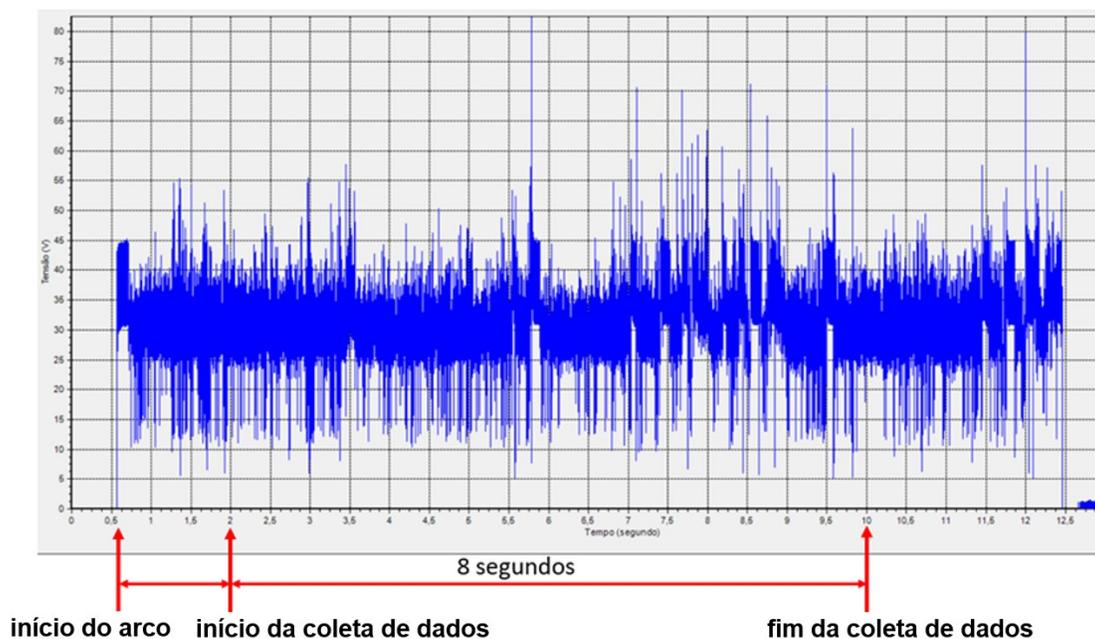
$$\text{Coeficiente de variação da corrente } KvI = \frac{\text{Desvio padrão da corrente}}{\text{Corrente média}} \times 100 \quad (3)$$

Com a finalidade de analisar o tipo de transferência metálica, utilizou-se a frequência de curtos circuitos. Este índice foi obtido a partir dos eventos de curtos circuitos dividido pelo tempo de amostragem (8 s). Para calcular os eventos de curto circuito, foram contabilizados os eventos com uma duração superior a 0,2 ms, onde a tensão do arco caiu de um valor de referência de 15 V. Adicionalmente, foram obtidos ciclogramas de potência para analisar a dispersão de pontos na região de curto circuito. Segundo CASTELLANOS-GONZALEZ et al. (2022b), os ciclogramas de potência são uma ferramenta importante para a análise de estabilidade e a ocorrência de curtos circuitos, já que permitem mediante um gráfico de pontos observar simultaneamente o comportamento da tensão do arco e da corrente.

Os sinais elétricos foram retirados a partir do 3º segundo para garantir que o processo tenha estabilidade ou uniformidade na coleta de dados, e a partir do 3º segundo foram levados 8 segundos

de dados para análise, após realizada a coleta de dados eles foram processados. o software SINAL, no qual foram obtidos valores médios e desvios padrão de cada valor medido.

Figura 34 – Metodologia usada para a aquisição dos sinais elétricos de tensão do arco e corrente



Fonte: Autor.

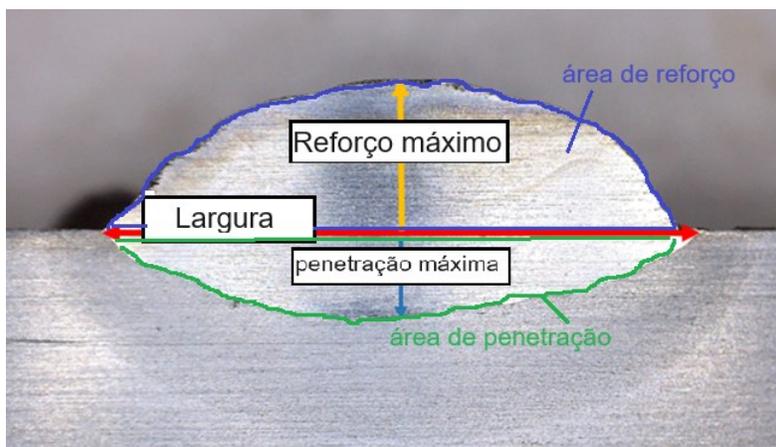
### 3.4.2 Caracterização da morfologia do cordão de solda

Uma vez que os cordões de solda foram realizados, foram cortadas seções de 10 mm de comprimento do metal de base, para obter as seções transversais e poder correlacioná-las com os sinais de tensão do arco e corrente obtidos, conforme a Figura 35. Posteriormente, as amostras foram embutidas em baquelite e desbastadas com lixas de grão 100, 350, 600, 1000, 1200 e 1500. Após o lixamento, as amostras foram polidas com um pano e lubrificante de alumina em suspensão de 1  $\mu\text{m}$  para obter uma superfície lisa. Em seguida, foram atacadas com Nital 10%, que permitiu revelar a macroestrutura obtida no metal depositado. Adicionalmente foram analisadas as amostras com um microscópio óptico e, com ajuda do software Image J, as dimensões relacionadas com o reforço máximo, a penetração máxima, a largura do cordão de solda, a área de reforço e a área de

penetração foram mensuradas, conforme a Figura 36. Além disso, a diluição do cordão de solda foi obtida a partir da equação 4.

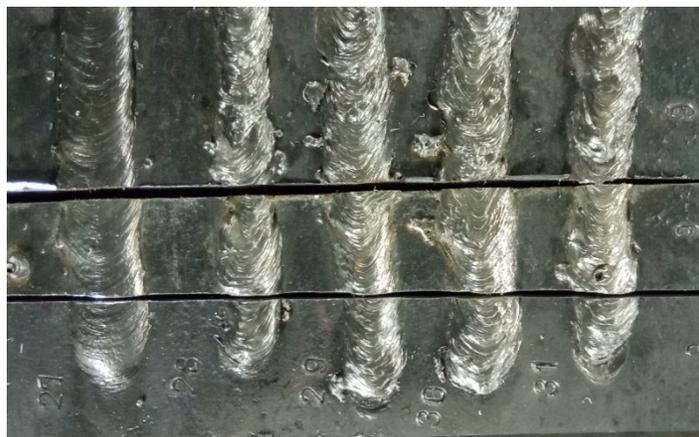
$$Diluição = \frac{\text{Área de penetração}}{\text{Área de penetração} + \text{Área de reforço}} \times 100 \quad (4)$$

Figura 35 – Dimensões mensuradas na seção transversal do cordão de solda.



Fonte: Autor

Figura 36 – Cortes transversais realizados no início dos cordões de solda



Fonte: Autor.

### 3.5 Fatores experimentais e Análise de Variância ANOVA

A Tabela 9 evidencia os 3 fatores utilizados neste trabalho e seus níveis, sendo o tipo de arame tubular, polaridade e condição. Cada tratamento foi replicado 3 vezes, com a finalidade de estimar o erro experimental.

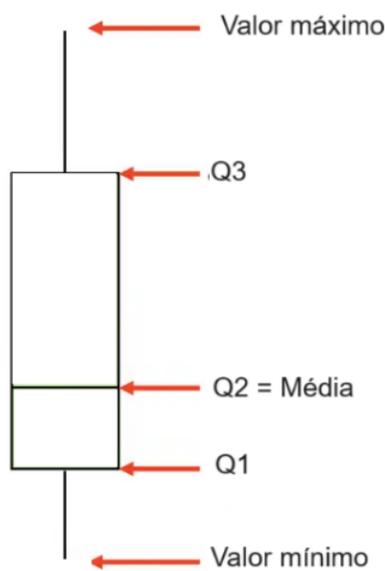
Tabela 9– Parâmetros variáveis (fatores) e seus níveis

| Fator         | Níveis      |
|---------------|-------------|
| Tipo de Arame | N1 e N2     |
| Polaridade    | DCEN e DCEP |
| Condição*     | 0, 0,3 e 30 |

Fonte: Autor. A condição 0 indica que o teste foi realizado ao ar, 0,3 indica que foi realizado em 0,3 m de profundidade e 30 indica que o teste foi realizado em 30 m de profundidade.

Foi utilizada a ANOVA unidirecional para avaliar o efeito da mudança do nível de cada fator sobre os sinais elétricos e a morfologia do cordão de solda. A ANOVA unidirecional foi conduzida utilizando o software Minitab, com um nível de confiança de 95%. Nesse sentido, um valor-p menor que 0,05 indica um impacto significativo do fator na variável de resposta (MONTGOMERY, 2008). Cabe ressaltar que nos apêndices do trabalho se expõe o extenso da análise de variância executada. Posteriormente, foram realizados gráficos Boxplot para a melhor visualização da distribuição dos dados obtidos. Tal como mostra a Figura 37, o Boxplot é um gráfico que permite representar os quartis da série de dados ( $Q$ ), assim como a média e os valores máximo e mínimo do conjunto de dados.

Figura 37 – Gráficos Boxplot e distribuição dos dados.



Fonte: Autor.

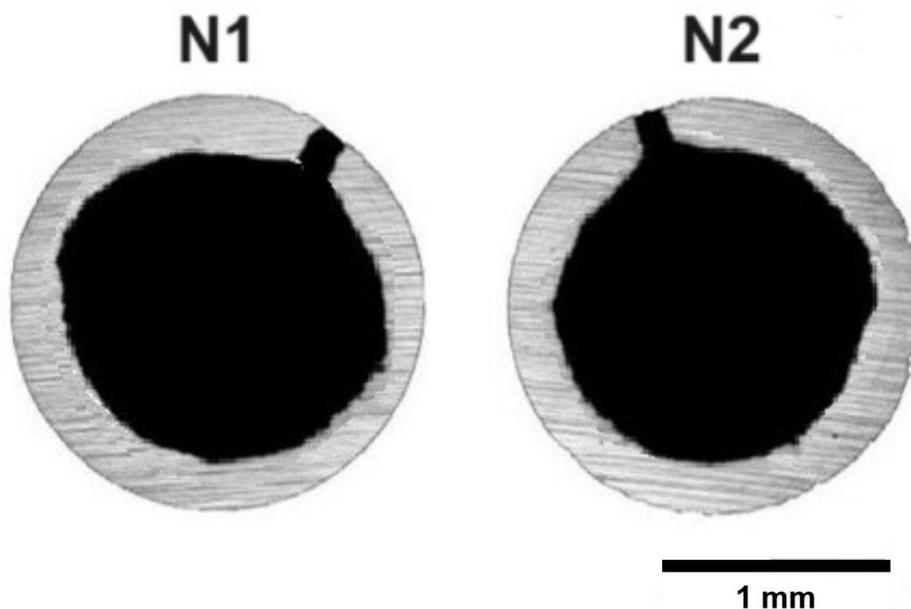
## 4 RESULTADOS

### 4.1 Caracterização dos arames tubulares obtidos

Como é mostrado na Figura 38, a seção transversal dos arames tubulares denota fechamento tipo topo. Também se destaca que o processo de fabricação permitiu a obtenção de arames tubulares ótimos para uma adequada alimentação a través das roldanas do sistema semiautomático até o metal de base, para a abertura e manutenção do arco. Adicionalmente, o diâmetro médio dos arames tubulares obtidos foi de 1,6 mm.

Como pode ser visto na Tabela 10, a taxa de enchimento média dos arames tubulares deste trabalho foi aproximadamente de 31%. Portanto, conseguiu-se alcançar uma taxa de enchimento superior aos arames tubulares fabricados com fita metálica de 0,5 mm de espessura empregados nos trabalhos de FERREIRA (2020) e CAMPOS (2021), sendo 25 e 22 %, respectivamente. Assim, comprovou-se que um arame tubular fabricado com uma fita metálica de 0,3 mm de espessura proporciona maior área interna para preenchimento com fluxo do que um arame tubular fabricado com uma fita metálica de 0,5 mm de espessura.

Figura 38- Seção transversal dos arames tubulares N1 e N2



Fonte: Autor

Tabela 10 – Taxa de enchimento mensurada para os arames tubulares N1 e N2

| Arame e amostra | Massa (g) arame cheio | Massa (g) arame sem fluxo | Taxa de enchimento (%) | Valor médio (%) | Desvio padrão (%) |
|-----------------|-----------------------|---------------------------|------------------------|-----------------|-------------------|
| N1_1            | 1,008                 | 0,700                     | 30,556                 |                 |                   |
| N1_2            | 1,016                 | 0,709                     | 30,217                 |                 |                   |
| N1_3            | 1,012                 | 0,695                     | 31,324                 | 30,961          | 0,691             |
| N1_4            | 1,028                 | 0,712                     | 30,739                 |                 |                   |
| N1_5            | 1,001                 | 0,681                     | 31,968                 |                 |                   |
| N2_1            | 1,05                  | 0,735                     | 30,000                 |                 |                   |
| N2_2            | 1,056                 | 0,732                     | 30,682                 |                 |                   |
| N2_3            | 1,044                 | 0,730                     | 30,077                 | 30,882          | 0,954             |
| N2_4            | 1,042                 | 0,715                     | 31,382                 |                 |                   |
| N2_5            | 1,035                 | 0,701                     | 32,271                 |                 |                   |

Fonte: Autor

#### 4.2 Estabilidade do arco

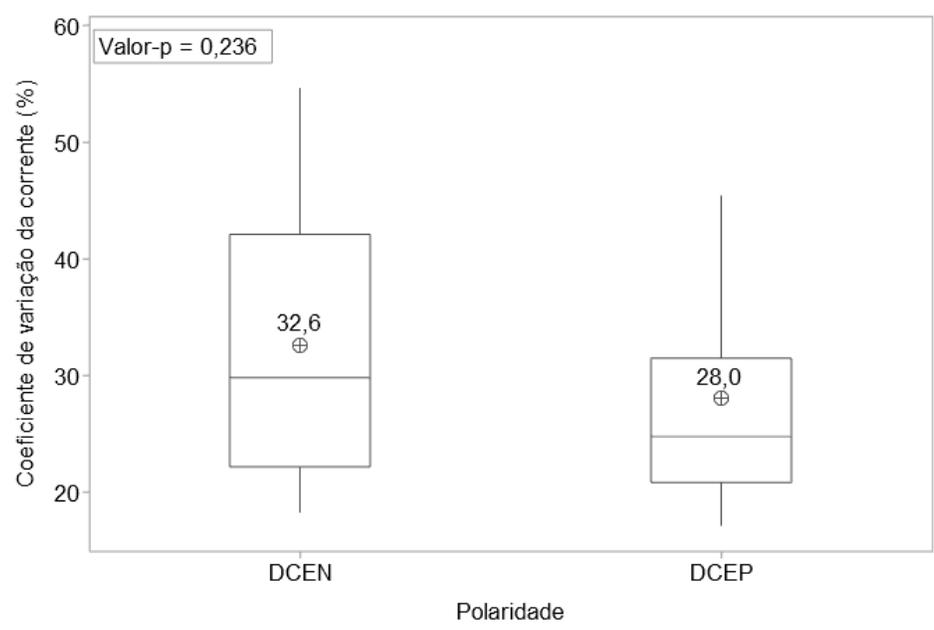
Na Tabela 11 são mostrados os resultados relacionados com o comportamento elétrico dos testes executados. Na Figura 39 evidencia-se que a polaridade não influi significativamente na estabilidade do processo (Valor-p > 0,05). No entanto, na Tabela 11 pode ser visto que para a polaridade DCEN em 30 m, utilizou-se o valor de tensão do arco de 32 V para o arame N2 em comparação com o valor de 28 V configurado para todos os experimentos. Isto se deve a que neste tratamento experimental houve dificuldade para acendimento e manutenção do arco. MORENO et al. (2020) mencionam que na polaridade DCEN existe uma afetação na geração de energia devido ao aumento da profundidade. Adicionalmente, o gráfico da Figura 40 demonstra com um valor-p ≤ 0,05, o efeito significativo do tipo de arame tubular sobre a estabilidade do processo. Se evidencia que o valor médio do coeficiente de variação da corrente aumenta de 26,7 % para 34,0 % quando é utilizado o arame tubular N2. Por tanto, o aumento da quantidade de níquel em detrimento de elementos ionizadores e estabilizadores do arco na composição do fluxo do arame tubular N2, também dificultou a manutenção do arco e a fusão do arame em 30 m, sobretudo na polaridade DCEN.

Tabela 11 - Dados coletados do comportamento elétrico do processo\*

| Teste | Tipo de arame tubular | Pol. | Con. (m) | U (V) | DPU (V) | I (A) | DPI (A) | KvI (%) | FCC  | Pot. (W) | Q (KJ/mm) |
|-------|-----------------------|------|----------|-------|---------|-------|---------|---------|------|----------|-----------|
| 1     | N1                    | -1   | 0        | 27,4  | 2,3     | 159,3 | 32,9    | 20,6    | 5,1  | 4337,4   | 1,0       |
| 2     | N1                    | -1   | 0,3      | 28,4  | 4,1     | 174,5 | 49,7    | 28,5    | 2,8  | 4860,2   | 1,2       |
| 3     | N1                    | -1   | 30       | 30,4  | 5,6     | 300,2 | 108,2   | 36,0    | 15,3 | 8813,3   | 2,1       |
| 4     | N1                    | 1    | 0        | 27,8  | 2,0     | 148,3 | 34,2    | 23,1    | 0,8  | 4077,7   | 1,0       |
| 5     | N1                    | 1    | 0,3      | 27,9  | 2,4     | 201,8 | 35,2    | 17,5    | 1,4  | 5597,7   | 1,3       |
| 6     | N1                    | 1    | 30       | 30,6  | 4,3     | 232,7 | 61,2    | 26,3    | 5,8  | 7034,5   | 1,7       |
| 7     | N1                    | -1   | 0        | 27,5  | 1,9     | 159,7 | 29,2    | 18,3    | 1,4  | 4372,6   | 1,0       |
| 8     | N1                    | -1   | 0,3      | 27,9  | 4,4     | 176,7 | 45,7    | 25,9    | 3,6  | 4836,3   | 1,2       |
| 9     | N1                    | -1   | 30       | 30,7  | 5,5     | 281,4 | 113,9   | 40,5    | 11,8 | 8293,2   | 2,0       |
| 10    | N1                    | 1    | 0        | 27,4  | 1,8     | 157,4 | 33,1    | 21,0    | 0,9  | 4273,5   | 1,0       |
| 11    | N1                    | 1    | 0,3      | 27,8  | 2,1     | 204,7 | 41,5    | 20,3    | 0,6  | 5646,7   | 1,4       |
| 12    | N1                    | 1    | 30       | 30,8  | 4,7     | 232,7 | 65,3    | 28,0    | 6,5  | 7053,1   | 1,7       |
| 13    | N1                    | -1   | 0        | 27,5  | 2,1     | 159,5 | 31,8    | 19,9    | 4,8  | 4354,2   | 1,0       |
| 14    | N1                    | -1   | 0,3      | 27,9  | 3,7     | 185,2 | 41,8    | 22,6    | 1,6  | 5098,2   | 1,2       |
| 15    | N1                    | -1   | 30       | 31,2  | 5,9     | 258,9 | 141,2   | 54,5    | 13,8 | 7603,9   | 1,8       |
| 16    | N1                    | 1    | 0        | 27,5  | 1,9     | 149,0 | 33,9    | 22,7    | 0,8  | 4102,3   | 1,0       |
| 17    | N1                    | 1    | 0,3      | 27,8  | 2,7     | 205,9 | 46,0    | 22,4    | 0,4  | 5651,9   | 1,4       |
| 18    | N1                    | 1    | 30       | 30,2  | 5,2     | 258,4 | 79,5    | 30,8    | 10,3 | 7617,3   | 1,8       |
| 19    | N2                    | -1   | 0        | 28,4  | 2,0     | 172,6 | 36,0    | 20,9    | 1,9  | 4873,3   | 1,2       |
| 20    | N2                    | -1   | 0,3      | 30,2  | 11,5    | 159,4 | 87,0    | 54,6    | 10,6 | 4286,3   | 1,0       |
| 21    | N2**                  | -1   | 30       | 34,1  | 5,8     | 295,7 | 91,0    | 30,8    | 8,9  | 9813,1   | 2,4       |
| 22    | N2                    | 1    | 0        | 28,1  | 2,1     | 161,1 | 32,0    | 19,9    | 0,9  | 4497,8   | 1,1       |
| 23    | N2                    | 1    | 0,3      | 28,1  | 4,2     | 210,7 | 55,8    | 26,5    | 3,4  | 5794,3   | 1,4       |
| 24    | N2                    | 1    | 30       | 32,2  | 8,2     | 256,8 | 111,9   | 43,6    | 28,8 | 7861,6   | 1,9       |
| 25    | N2                    | -1   | 0        | 28,1  | 3,3     | 170,0 | 50,0    | 29,4    | 9,3  | 4702,1   | 1,1       |
| 26    | N2                    | -1   | 0,3      | 29,8  | 9,8     | 160,6 | 75,6    | 47,1    | 6,9  | 4402,7   | 1,1       |
| 27    | N2**                  | -1   | 30       | 34,6  | 5,7     | 315,3 | 77,3    | 24,5    | 12,8 | 10691,3  | 2,6       |
| 28    | N2                    | 1    | 0        | 27,8  | 3,7     | 168,7 | 39,3    | 23,3    | 1,8  | 4605,7   | 1,1       |
| 29    | N2                    | 1    | 0,3      | 27,8  | 2,8     | 219,5 | 37,7    | 17,2    | 0,9  | 6061,9   | 1,5       |
| 30    | N2                    | 1    | 30       | 30,8  | 8,4     | 261,7 | 118,7   | 45,4    | 35,5 | 7586,2   | 1,8       |
| 31    | N2                    | -1   | 0        | 27,8  | 3,1     | 165,4 | 50,0    | 30,2    | 10,1 | 4515,4   | 1,1       |
| 32    | N2                    | -1   | 0,3      | 29,9  | 9,5     | 160,0 | 76,0    | 47,5    | 7,5  | 4405,4   | 1,1       |
| 33    | N2**                  | -1   | 30       | 33,6  | 5,6     | 296,9 | 101,9   | 34,3    | 14,5 | 9661,4   | 2,3       |
| 34    | N2                    | 1    | 0        | 27,9  | 4,5     | 167,1 | 44,5    | 26,7    | 1,3  | 4558,1   | 1,1       |
| 35    | N2                    | 1    | 0,3      | 28,6  | 6,7     | 201,0 | 67,5    | 33,6    | 3,3  | 5487,5   | 1,3       |
| 36    | N2                    | 1    | 30       | 32,1  | 7,9     | 226,8 | 129,0   | 56,9    | 19,4 | 6770,6   | 1,6       |

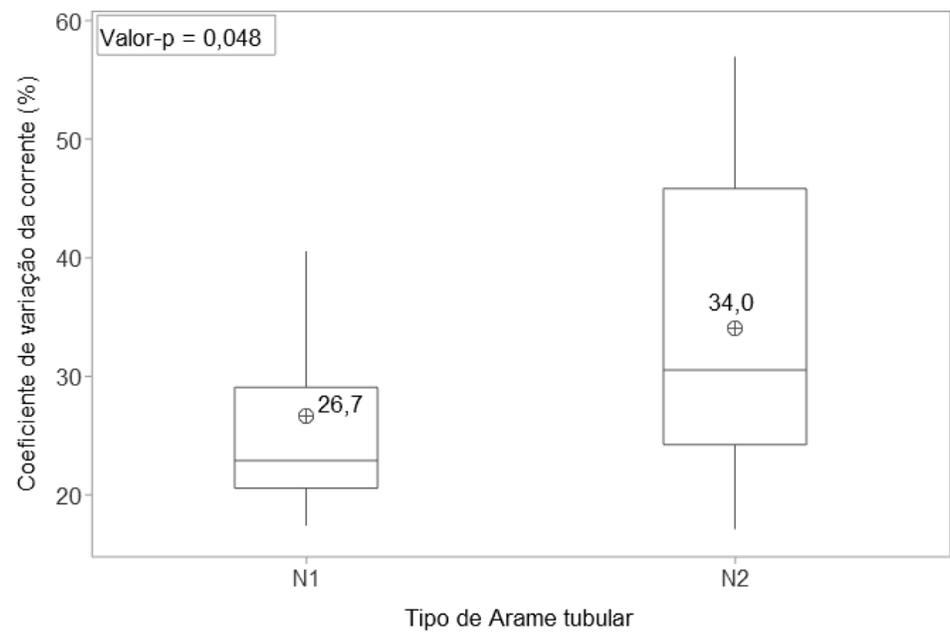
\*Pol= Polaridade; Con. = Condição U= Tensão do arco; DPU= Desvio padrão da tensão do arco; I= Corrente; DPI= Desvio padrão da corrente; KvI= Coeficiente de variação da corrente; FCC = Frequência de curto circuito; Pot. = Potência; Q = Aporte térmico \*\* Testes executados com 32 V.

Figura 39 - Boxplot do efeito da polaridade sobre o coeficiente de variação da corrente de soldagem



Fonte: Autor

Figura 40 - Boxplot do efeito do tipo de arame tubular sobre o coeficiente de variação da corrente de soldagem



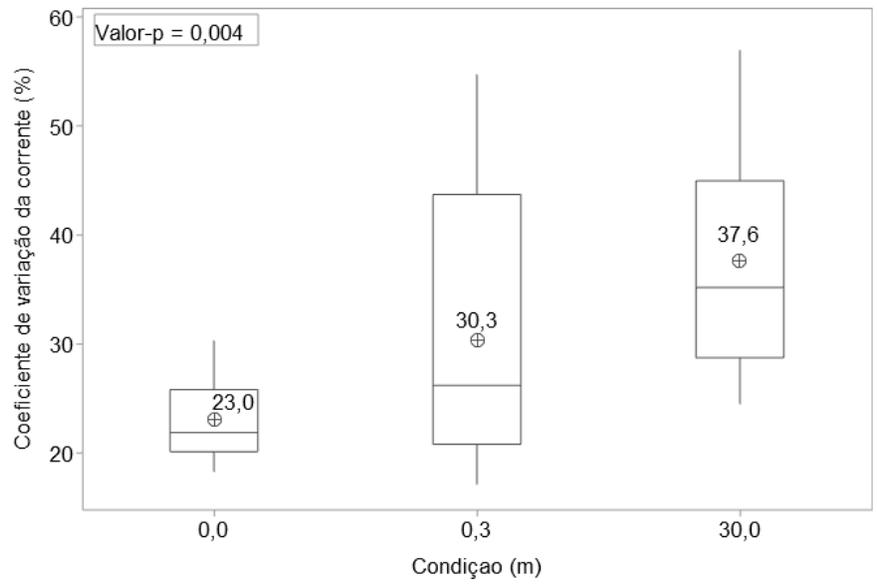
Fonte: Autor

O gráfico da Figura 41 mostra com um valor- $p \leq 0,05$  que a condição influencia significativamente no coeficiente de variação da corrente. Inicialmente, na soldagem ao ar o coeficiente de variação da corrente é 23,0 %. Posteriormente, quando o processo é executado em lâmina de água, o valor médio do coeficiente de variação aumenta para 30,3%. Finalmente, na profundidade de 30 m aumenta o valor médio do coeficiente de variação da corrente para 37,6 %.

A mudança de condição de ambiente seco para úmido promove a perda de calor devido à água circundante, por tanto, maior quantidade de energia é precisa para fundir o arame tubular (SANCHEZ-LOBO et al., 2022). Em consequência, obteve-se um acréscimo da flutuação da corrente devido a mudança de condição, dificultando a manutenção do arco. Assim, a fonte de soldagem tenta compensar essas variações de corrente mediante o controle eletrônico da tensão do arco. Nesse sentido, o coeficiente de variação da corrente é maior na soldagem molhada do que na soldagem atmosférica. Adicionalmente, a constrição do arco com aumento da pressão hidrostática afeta a disponibilidade de energia para a fusão estável da ponta do arame, sendo insuficiente a quantidade de corrente fornecida pela fonte, com a mesma configuração de tensão. (CASTELLANOS-GONZALEZ, 2024; OMAJENE et al., 2014). Assim, a estabilidade do processo deteriora-se com aumento da profundidade até 30 m.

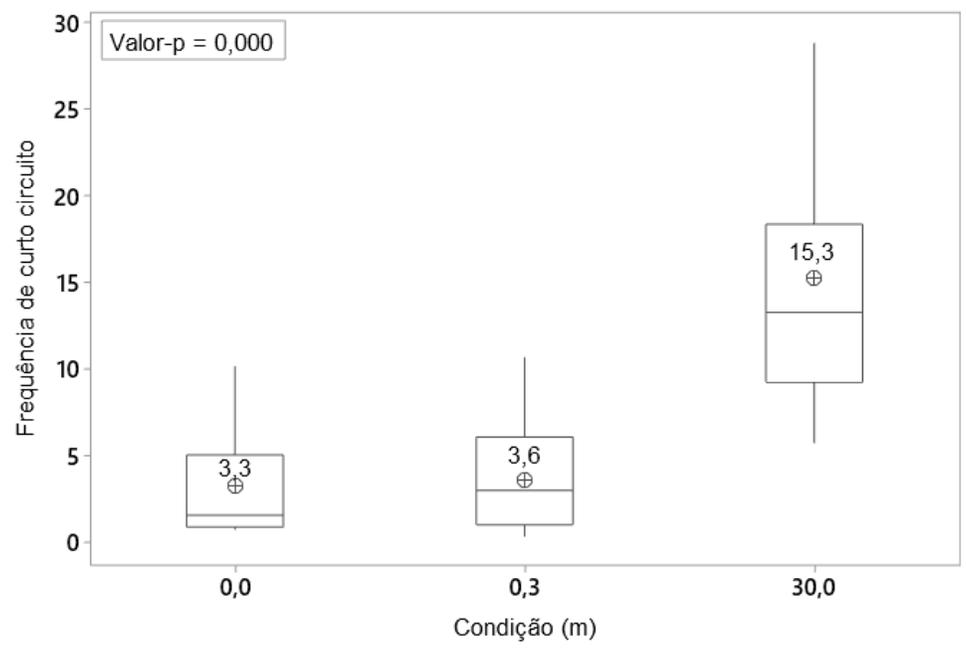
Na Figura 42 vê-se que a condição é fator determinante sobre o valor médio de curto circuito. Em relação à soldagem ao ar, o valor médio da frequência de curto circuito é 3,3 e aumenta somente até 3,6 na condição de lâmina de água. Contudo, com o aumento da pressão hidrostática, o valor médio da frequência de curto circuito aumenta até 15,3. Também, o efeito da condição pode ser corroborado com os ciclogramas de potência da Figura 43. Embora a transferência metálica por curto circuito seja predominante nas três condições, essa tendência é acentuada na maior profundidade, resultando em uma maior dispersão de pontos na região de curto circuito apontada com o retângulo vermelho. Segundo CHEN et al. (2018), a redução do tamanho da bolha protetora do arco e seu tempo de duração, devido ao incremento da pressão de trabalho, impossibilita a conservação de um arco estável. Em consequência, acontece uma maior flutuação da corrente e a tensão do arco, obtendo-se maiores áreas de extinção do arco e de curto circuito. Adicionalmente, as Figuras 44 e 45 mostram que o tipo de arame e a polaridade não são fatores significantes sobre a mudança do valor médio da frequência de curto circuito (Valor- $p > 0,05$ ).

Figura 41- Boxplot do efeito da condição sobre o coeficiente de variação da corrente de soldagem



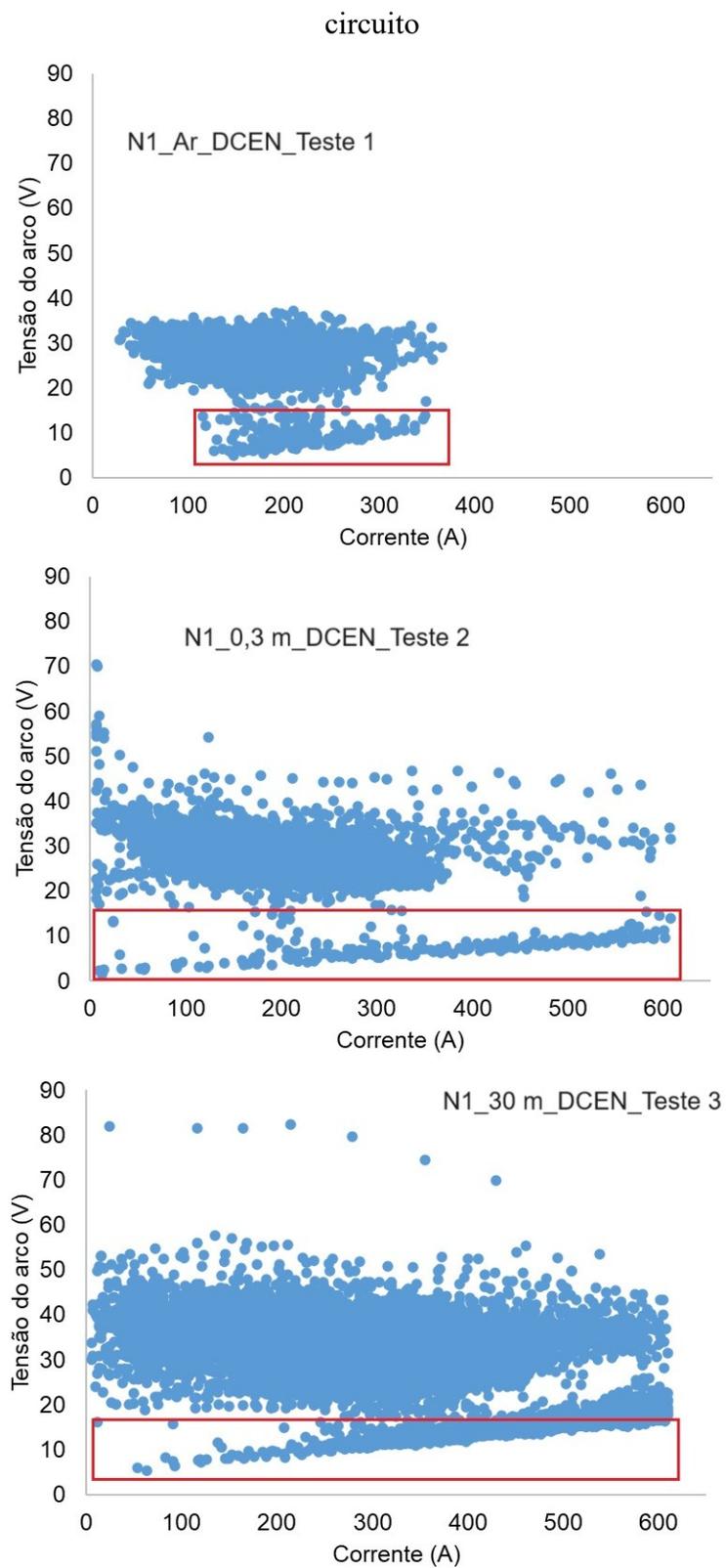
Fonte: Autor

Figura 42- Boxplot do efeito da condição sobre a frequência de curto circuito



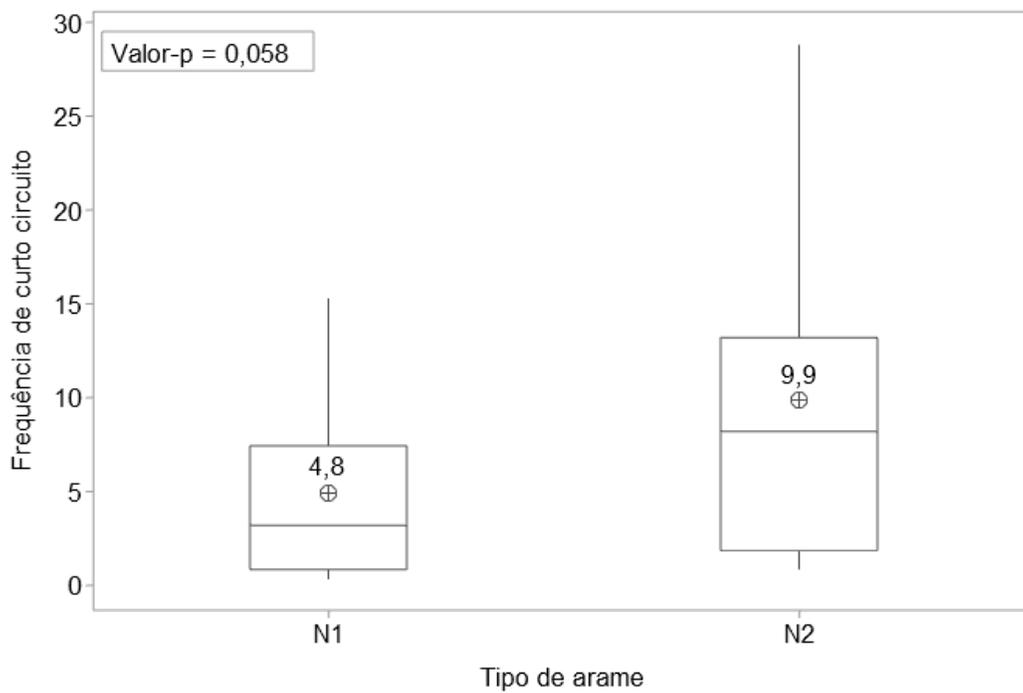
Fonte: Autor

Figura 43- Ciclogramas de potência representativos do efeito da condição na região de curto circuito



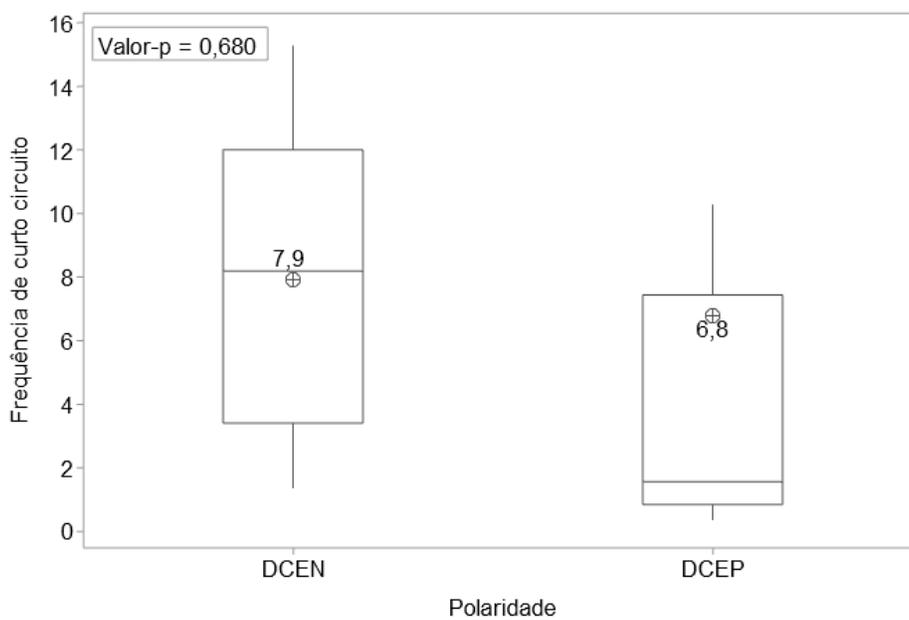
Fonte: Autor

Figura 44 - Boxplot do efeito do tipo de arame sobre a frequência de curto circuito



Fonte: Autor.

Figura 45 - Boxplot do efeito do tipo de arame sobre a frequência de curto circuito



Fonte: Autor

### 4.3 Morfologia do cordão de solda

Na Tabela 12 são mostrados os resultados relacionados com morfologia da seção transversal do cordão de solda dos testes realizados. Adicionalmente, a Tabela 13 mostra o valor-p obtido para cada resposta, em função dos fatores. Por um lado, pode se notar que a condição é o único fator significativo na mudança do valor médio da penetração máxima e do reforço. Por outro lado, a polaridade é o único fator significativo na mudança do valor médio da largura. Adicional a isso, nenhum fator demonstrou ser significativo para a mudança do valor médio da diluição.

Tabela 12 - Dados coletados da morfologia do cordão de solda\*

| Teste | Tipo de arame tubular | Pol. | Con. (m) | P (mm) | L (mm) | R (mm) | D (%) |
|-------|-----------------------|------|----------|--------|--------|--------|-------|
| 1     | N1                    | -1   | 0        | 1,4    | 11,0   | 2,4    | 34,8  |
| 2     | N1                    | -1   | 0,3      | 1,6    | 10,3   | 2,9    | 37,8  |
| 3     | N1                    | -1   | 30       | 3,2    | 9,6    | 5,8    | 33,0  |
| 4     | N1                    | 1    | 0        | 1,4    | 10,9   | 2,7    | 35,2  |
| 5     | N1                    | 1    | 0,3      | 2,4    | 12,8   | 3,1    | 45,8  |
| 6     | N1                    | 1    | 30       | 3,2    | 12,2   | 3,5    | 44,4  |
| 7     | N1                    | -1   | 0        | 1,4    | 10,0   | 2,5    | 34,8  |
| 8     | N1                    | -1   | 0,3      | 1,5    | 11,5   | 3,0    | 38,7  |
| 9     | N1                    | -1   | 30       | 3,6    | 8,7    | 5,9    | 30,0  |
| 10    | N1                    | 1    | 0        | 1,6    | 12,2   | 2,5    | 36,7  |
| 11    | N1                    | 1    | 0,3      | 2,7    | 11,7   | 2,2    | 59,7  |
| 12    | N1                    | 1    | 30       | 3,5    | 12,4   | 3,1    | 45,8  |
| 13    | N1                    | -1   | 0        | 1,5    | 11,3   | 2,4    | 39,5  |
| 14    | N1                    | -1   | 0,3      | 2,2    | 12,8   | 2,9    | 44,1  |
| 15    | N1                    | -1   | 30       | 4,5    | 7,1    | 5,9    | 35,9  |
| 16    | N1                    | 1    | 0        | 1,6    | 11,1   | 2,7    | 35,4  |
| 17    | N1                    | 1    | 0,3      | 1,6    | 13,0   | 2,8    | 37,9  |
| 18    | N1                    | 1    | 30       | 2,0    | 11,7   | 2,8    | 36,1  |
| 19    | N2                    | -1   | 0        | 1,9    | 10,7   | 2,5    | 43,9  |
| 20    | N2                    | -1   | 0,3      | 1,0    | 8,5    | 2,6    | 21,8  |
| 21    | N2**                  | -1   | 30       | 5,5    | 14,0   | 5,1    | 44,1  |
| 22    | N2                    | 1    | 0        | 1,6    | 10,9   | 2,7    | 36,8  |
| 23    | N2                    | 1    | 0,3      | 3,3    | 11,4   | 2,8    | 49,5  |
| 24    | N2                    | 1    | 30       | 2,7    | 11,0   | 3,9    | 37,6  |
| 25    | N2                    | -1   | 0        | 2,1    | 10,4   | 2,5    | 44,8  |
| 26    | N2                    | -1   | 0,3      | 1,3    | 8,5    | 2,0    | 35,7  |
| 27    | N2**                  | -1   | 30       | 5,5    | 12,6   | 5,2    | 43,5  |

|    |      |    |     |     |      |     |      |
|----|------|----|-----|-----|------|-----|------|
| 28 | N2   | 1  | 0   | 1,7 | 12,1 | 3,0 | 40,4 |
| 29 | N2   | 1  | 0,3 | 3,3 | 12,3 | 3,2 | 45,7 |
| 30 | N2   | 1  | 30  | 3,0 | 11,1 | 3,6 | 45,5 |
| 31 | N2   | -1 | 0   | 1,7 | 11,5 | 2,8 | 35,1 |
| 32 | N2   | -1 | 0,3 | 1,4 | 9,2  | 3,2 | 33,8 |
| 33 | N2** | -1 | 30  | 4,8 | 12,0 | 4,4 | 46,5 |
| 34 | N2   | 1  | 0   | 1,6 | 11,0 | 2,9 | 35,9 |
| 35 | N2   | 1  | 0,3 | 2,6 | 11,2 | 2,6 | 51,5 |
| 36 | N2   | 1  | 30  | 2,3 | 10,5 | 3,9 | 27,8 |

\*Pol= Polaridade; Con. = Condição; P = Penetração máxima; L = Largura; R = Reforço máximo; D = Diluição  
 \*\* Testes executados com 32 V.

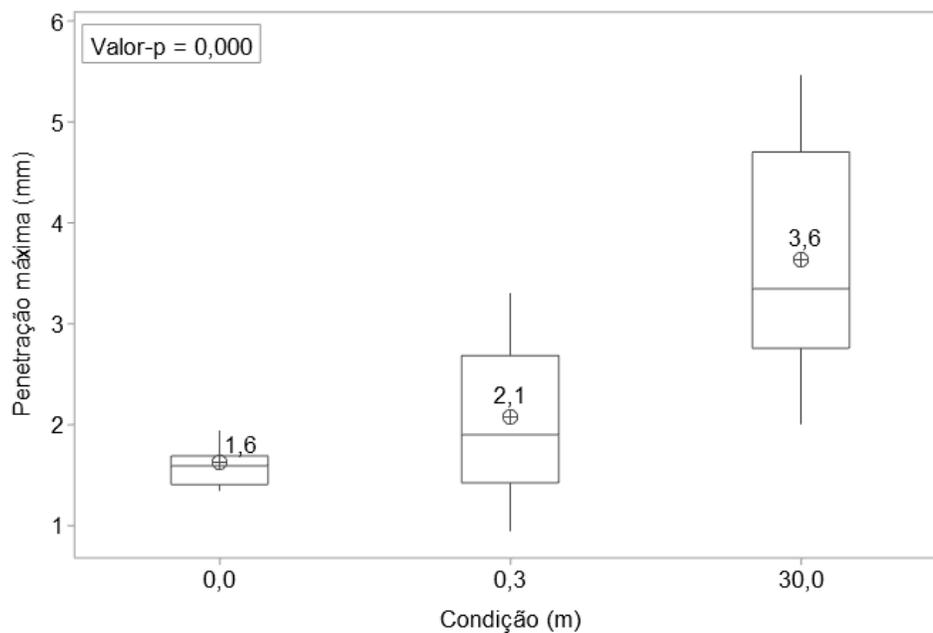
Tabela 13 - Dados coletados da morfologia do cordão de solda\*

| Resposta/Fator    | Tipo de arame | Polaridade | Condição |
|-------------------|---------------|------------|----------|
| Penetração máxima | 0,379         | 0,575      | 0,000*   |
| Largura           | 0,892         | 0,019*     | 0,997    |
| Reforço máximo    | 0,989         | 0,112      | 0,000*   |
| Diluição          | 0,735         | 0,102      | 0,379    |

\* valor-p  $\leq$  0,05 demonstra a significância do fator sobre a resposta

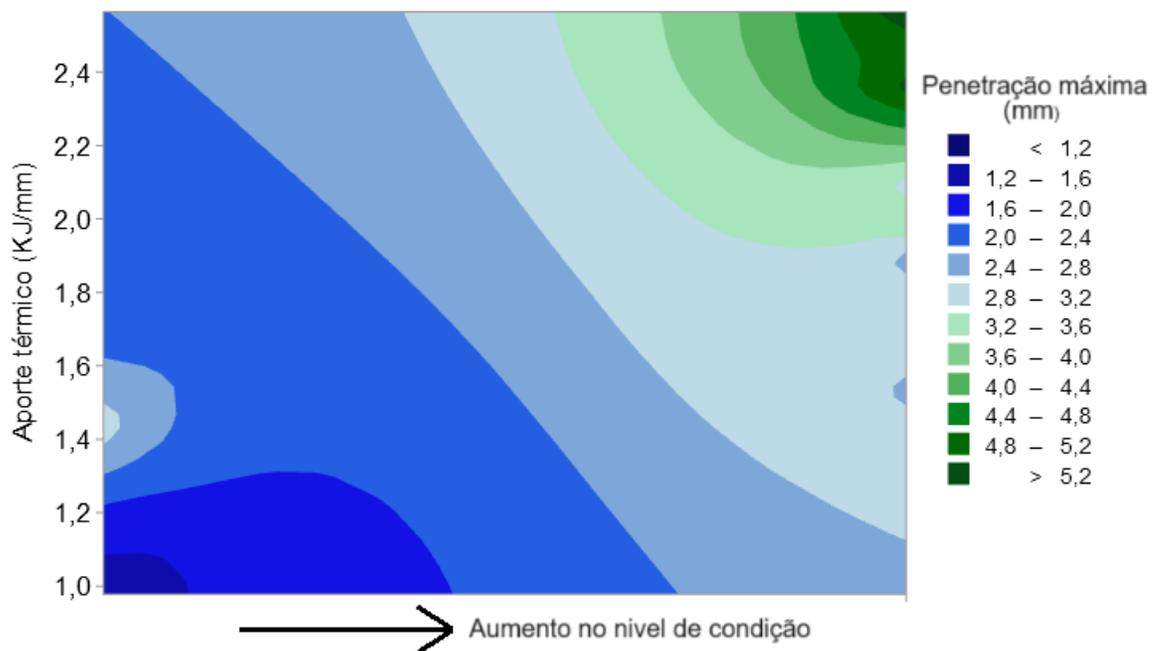
Na Figura 46 se observa que o valor médio da penetração máxima aumenta de 1,6 para 2,1 mm quando é mudada a condição de soldagem ao ar para lâmina de água. Adicional a isso, com o aumento da profundidade, acontece o acréscimo do valor médio da penetração máxima até 3,6 mm. Para compreender melhor o efeito da condição sobre a penetração máxima, foi realizado o gráfico de contorno da Figura 47. Com o aumento no nível de condição, se evidencia um acréscimo do aporte térmico, e por conseguinte, a penetração máxima aumenta. O aumento do aporte térmico com a profundidade se deve ao incremento da corrente média em função de uma maior demanda de energia para a fusão do eletrodo como resultado da constrição do arco. O incremento da corrente se associa com maior penetração porque tem-se uma maior força do arco elétrico, além de uma maior quantidade de calor é introduzida na poça de fusão (MOSTAFA e KHAJAVI, 2006; KARADENIZ et al., 2007)

Figura 46. Boxplot do efeito da condição sobre a penetração máxima



Fonte: Autor

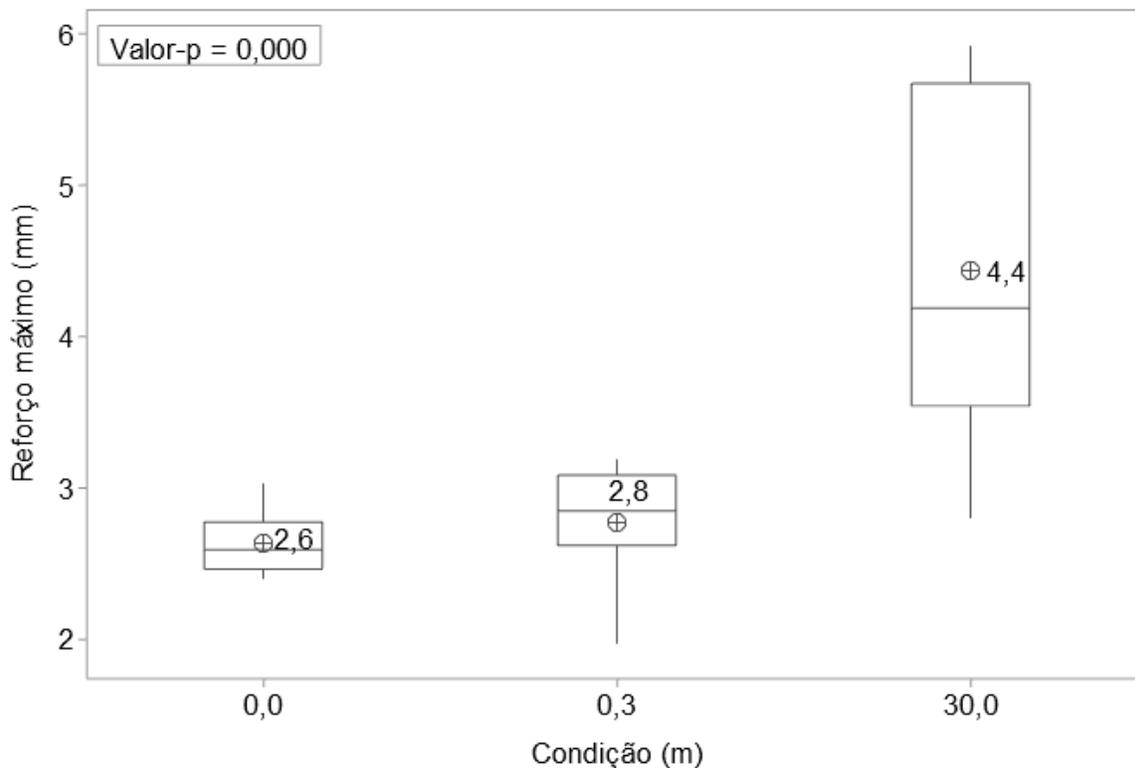
Figura 47. Gráfico de contorno do efeito do aporte térmico e o aumento no nível de condição sobre a penetração máxima



Fonte: Autor

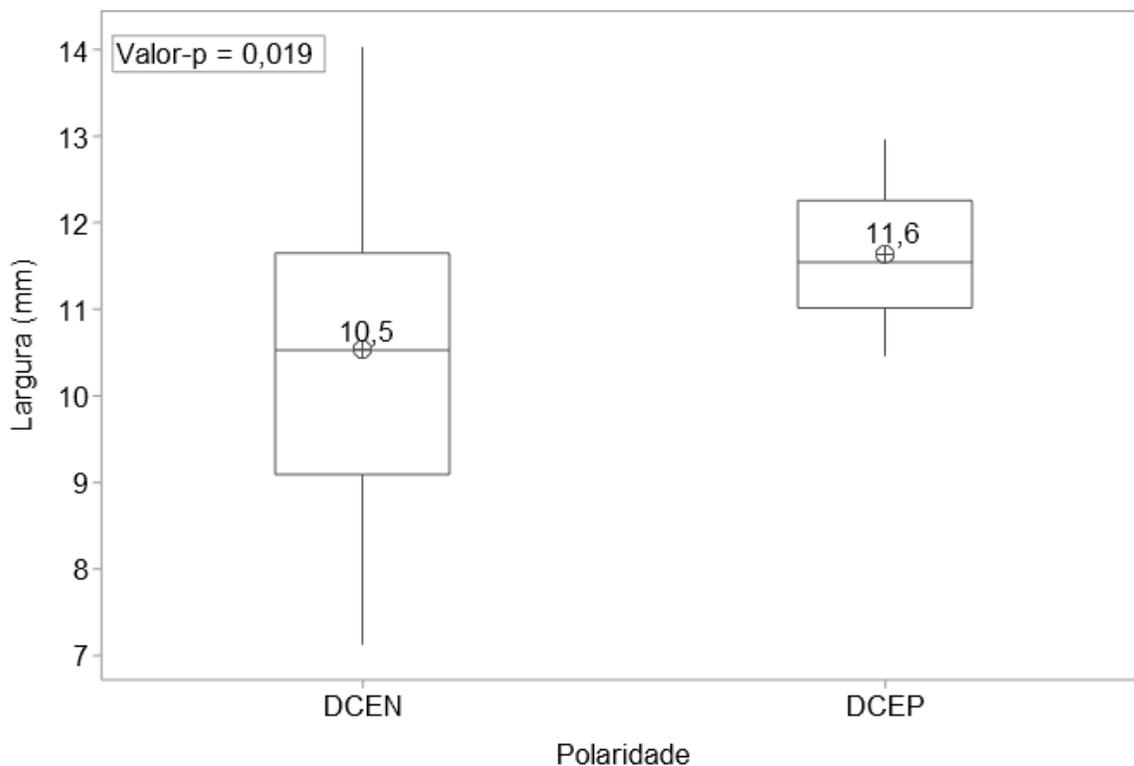
Na Figura 48 se observa que o valor médio do reforço máximo aumentou levemente de 2,6 para 2,8 mm quando modificada a condição de soldagem ao ar para soldagem molhada em 0,3 m de profundidade. Contudo, o valor médio do reforço máximo apresenta um incremento mais acentuado na profundidade de 30 m, sendo o valor médio de 4,4 mm. Da mesma maneira que aumentou a penetração máxima com a condição, também pode-se correlacionar o aumento do valor médio do reforço máximo com um maior aporte térmico na soldagem molhada em 0,3 m e o posterior aumento da pressão de água até 30 m. Na Figura 49, pode-se observar que na polaridade DCEP obteve-se um valor médio de largura de 11,6 mm em comparação com o valor de 10,5 mm obtido em DCEN. Nesse sentido, como em DCEP o 70% do calor é gerado na peça, uma maior quantidade de calor provocou uma poça de fusão mais ampla e fluida. Como consequência, o metal fundido tem uma maior área de extensão, o que resulta em um cordão de solda mais largo.

Figura 48. Boxplot do efeito da condição sobre o reforço máximo.



Fonte: Autor

Figura 49. Boxplot do efeito da polaridade sobre a largura do cordão de solda



Fonte: Autor

#### 4.4 Aparência superficial do cordão de solda

Com o intuito de avaliar a qualidade superficial dos cordões obtidos, foi analisado um cordão por combinação de parâmetros. De maneira geral, o fator que influenciou mais na aparência superficial dos cordões foi a condição.

Na Figura 50 são mostrados os cordões de solda realizados com os arames N1 e N2 em ambas as polaridades, na condição de soldagem atmosférica. Por um lado, se evidencia que, os cordões depositados com o arame N1 são muito similares nas duas polaridades. A sua qualidade superficial é aceitável, com um reforço com pouco nível de porosidade e boa molhabilidade. Por outro lado, também se evidencia adequada qualidade dos cordões realizados com o arame tubular

N2, sem poros superficiais e regularidade do reforço. Adicionalmente, pode-se ver grande quantidade de respingos nos 4 tratamentos executados na soldagem atmosférica.

Na Figura 51 são mostrados os cordões de solda depositados com os arames N1 e N2 em ambas as polaridades, na condição de soldagem subaquática molhada em 0,3 m de profundidade. Se evidencia que os cordões depositados em N2 diminuíram a qualidade com a mudança de condição, em ambas as polaridades. Nesse sentido, foram observados cordões de solda com reforço não uniforme ao longo do seu comprimento, além de grande quantidade de mordeduras, associadas provavelmente ao resfriamento rápido devido ao ambiente úmido. Já para os cordões realizados com o arame N1, se evidencia aceitável qualidade superficial, com um reforço uniforme, sem porosidade superficial e uma molhabilidade superior aos cordões depositados com o arame N2 na mesma condição.

Na Figura 52 são mostrados os cordões de solda depositados com os arames N1 e N2 em ambas as polaridades, na condição de soldagem subaquática molhada em 30 m de profundidade. Se evidencia que o aumento da profundidade deteriorou a qualidade dos cordões realizados, sobretudo na polaridade DCEN. Esse comportamento também é relatado por ZHANG et al. (2016), onde os autores demonstraram que na soldagem ao ar houve uma melhor consistência do cordão de solda em comparação com a soldagem molhada. Também, CHENG et al. (2018), demonstraram que o aumento da profundidade deteriorou a aparência superficial do cordão. Além disso, em alguns cordões se evidenciam pontas de arame sem fundir, isso permite demonstrar a falta de energia disponível para a fusão estável do arame tubular em alta profundidade.

Adicionalmente, no APÊNDICE G deste trabalho, são relacionadas as seções transversais dos cordões obtidos para os fatores comparados. Por um lado, pode-se evidenciar que a porosidade nas soldas realizadas ao ar e em 0,3 m de profundidade, não apresentam porosidade. Por outro lado, se evidencia um alto nível porosidade quando a pressão hidrostática é de 30 m, para os dois arames tubulares nas duas polaridades.

Figura 50. Cordões de solda depositados na soldagem atmosférica, com os dois arames e nas duas polaridades.



Fonte: Autor

Figura 51. Cordões de solda depositados em 0,3 m de profundidade, com os dois arames e nas duas polaridades.



Fonte: Autor

Figura 52. Cordões de solda depositados em 30 m de profundidade, com os dois arames e nas duas polaridades.



Fonte: Autor

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho se mostrou a fabricação de dois arames tubulares com adição de níquel, com o intuito de serem aplicados na soldagem subaquática molhada. Além disso, foi executado o estudo do comportamento operacional e a caracterização da morfologia e qualidade superficial dos cordões depositados. O níquel é conhecido por ser um elemento que estabiliza a austenita em temperatura ambiente. Por sua vez, a austenita demonstrou ser uma estrutura que ajuda a diminuir o hidrogênio difusível e suscetibilidade por trincamento a frio. Nesse sentido, este trabalho representa ser um aporte para o estudo de mais formulações com o níquel como elemento protagonista, na composição química de arames tubulares utilizados na soldagem molhada. As principais conclusões desta investigação são as seguintes:

- A condição e o tipo de arame tubular demonstraram que são fatores com efeito significativo sobre a estabilidade do processo, a qual foi mensurada mediante o coeficiente de variação da corrente. Por um lado, a constrição do arco devido a profundidade e ao ambiente molhado diminuíram a estabilidade do processo. Por outro, um arame tubular com maior quantidade de níquel, em detrimento de elementos ionizadores e estabilizadores do arco, demonstrou ser fator determinante na instabilidade, sobretudo em 30 m na polaridade DCEN.

- Somente a condição foi o fator significativo sobre a mudança do valor médio da frequência de curto circuito, sendo o modo de transferência metálica por curto circuito o predominante nas três condições. No entanto, o aumento da pressão hidrostática evidenciou ser a condição com maior efeito, sendo esse comportamento validado com os ciclogramas de potência.

- Foi identificada uma correlação positiva entre a penetração máxima e a condição, o qual foi atribuído ao incremento do aporte térmico na soldagem molhada, e ao posterior aumento da profundidade. Esse aumento do aporte térmico, também incrementou de maneira significativa o valor médio do reforço máximo.

- Foi obtido um maior valor médio da largura do cordão de solda na polaridade DCEP em comparação com DCEN. Portanto, como em DCEP o 70% do calor é gerado na peça, uma maior quantidade de calor provocou uma poça de fusão mais ampla e fluida. Como consequência, o metal fundido com uma maior área de extensão resultou em um cordão de solda mais largo.

- A instabilidade devido à falta de energia disponível para fundir o arame tubular, demonstrou estar relacionada com o deterioro da qualidade superficial do cordão de solda.

- Não se tem porosidade transversal nos cordões de solda depositados ao ar e em 0,3 m de profundidade, para os dois tipos de arame tubular nas duas polaridades. No entanto, o alto nível de porosidade pode ser observado com o aumento da pressão hidrostática até 30 m

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Foram obtidos cordões de solda com qualidade aceitável em soldagem atmosférica e em 0,3 m de profundidade, e com evidentes irregularidades em 30 m. Por tanto, é importante como sugestão para trabalhos futuros, que sejam executadas análises de hidrogênio e oxigênio com o intuito de associar o comportamento elétrico com a composição química do metal de solda e sua qualidade.

Como foi visto, o aumento do níquel em detrimento de elementos estabilizadores e ionizadores do arco comprometeu a estabilidade do processo. Nesse sentido, como sugestão para trabalhos futuros, poderiam ser utilizadas formulações com 20 a 40 % em peso de níquel.

Poderiam ser executados trabalhos futuros com fita metálica de níquel, substituindo a fita de aço carbono, com a finalidade de aumentar a quantidade de níquel no metal de solda, e adicionar mais elementos estabilizadores e ionizadores do arco dentro do núcleo (fluxo).

Como trabalho futuro, seria interessante a soldagem de metal de base de aço inoxidável, e posterior análise da sua microestrutura, com a finalidade de estudar o comportamento operacional dos arames tubulares experimentais com adição de níquel na soldagem de aço inoxidáveis.

## REFERÊNCIAS

ANAND, A.; KHAJURIA, A. Welding processes in marine application: A review. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, v. 2, n. 1, p. 215–225, 2015.

ARIAS CHAVARRÍA, Á.; CUBILLO ARAYA, A. V.; GUTIÉRREZ ROJAS, D. Propuesta de protocolo de Seguridad y Salud Ocupacional según los peligros y riesgos inherentes en las actividades subacuáticas del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) en el primer semestre del 2018. <https://repositorio.utn.ac.cr/handle/123456789/144>. 2018.

ASSUNÇÃO. Estudo sobre o efeito da água no bico de contato no processo de soldagem subaquática molhada com arame tubular do tipo auto protegido. Dissertação de mestrado. 2018.

ASSUNÇÃO e BRACARENSE. A novel strategy to improve melting efficiency and arc stability in underwater FCAW via contact tip air chamber. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023.

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, 2009a.

BRACARENSE et al. The influence of the mineralogical composition of waterproof varnish layer of rutile electrodes on porosity in underwater wet welding. *Rev. Fac. Ing.-Univ. Ant.* 27(50), 63–76, 2009b.

BRACARENSE et al. *Soldagem - Fundamentos e Tecnologia*. GEN LTC; 1ª edição. 2021.

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.

CAMPOS, E. Efeito da adição de PTFE no fluxo de arames tubulares sobre o arco elétrico em soldagem subaquática molhada. Tese da Universidade Federal de Minas Gerais, 2021.

CASTELLANOS-GONZALEZ et al. Manufactura De Alambre Tubular Autoprottegido Y Evaluación De Condiciones Operacionales En Soldadura Submarina. *Investigación e Innovación en Ingenierías* 9(1):167-179. DOI:10.17081/invinno.9.1.4015. 2021.

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, 2022a.

CASTELLANOS-GONZALEZ et al. Qualitative and quantitative study of arc stability in underwater wet welding using oscillograms, histograms and cyclograms. IX Encuentro Internacional de Innovación Tecnológica. 2022b.

CASTELLANOS-GONZALEZ, OM. Estudo do efeito do uso de parâmetros de corrente pulsada na soldagem molhada com eletrodo revestido. Dissertação de mestrado da Universidade Federal de Minas Gerais. 2024.

CHAN, S. L. I. Hydrogen trapping ability of steels with different microstructures. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Taylor & Francis, v. 22, n. 1, p. 43–53, 1999.

CHEN et al. Effect of hydrostatic pressure on protective bubble Effect of hydrostatic pressure on protective bubble characteristic and weld quality in underwater flux-cored wire wet welding. 2018.

CHEN et al. The mechanisms of underwater wet flux-cored arc welding assisted by ultrasonic frequency pulse high-current. *Journal of Materials Processing Technology*. 2022.

CLEMENTE-CARDOSO, A. Efeito da polaridade, profundidade e corrente no desempenho operacional da soldagem subaquática com eletrodos revestido de aço inoxidável. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. 2022.

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.

DEEPAK, C. RAHUL, A. NAVNEET, M. RAJEEV. Investigation of  $TiO_2-SiO_2-CaO-CaF_2$  based electrode coatings on weld metal chemistry and mechanical behaviour of bimetallic welds. *J Manuf Process*, 23, pp. 61-74. 2016.

DI, X., JI, S., CHENG, F., WANG, D., & CAO, J. Effect of cooling rate on microstructure, inclusions and mechanical properties of weld metal in simulated local dry underwater welding. *Materials & Design*, 88, 505-513. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.025>. 2015.

DOS SANTOS et al., 2020. Influência do Aporte Térmico sobre as Características e Propriedades de Cordões de Solda dos Aços AISI 316 e AISI 316L. <https://www.scielo.br/j/si/a/Z7fPkjJtqQ4DyLjSbQQmFpC/?lang=pt#>

FATTAHI, M. ABBASI, H. ZALAGHI, A. EYNALVANDPOUR, A.R. DABIRI, Y. FATTAHI. Reduction of weld metal diffusible hydrogen content by adding colloidal nanosilica to the electrode coating, *Int J Hydrogen Energy*, 41 (30), pp. 13294-13298. 2016.

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

FERREIRA, M. Fabricação de eletrodo arame tubular auto protegido composto por tubo de aço carbono e fluxo contendo FE-CR-NI para a formação de aço inoxidável como metal de solda na soldagem subaquática de aço carbono A36. Dissertação de mestrado da Universidade Federal de Minas Gerais. 2020.

FYDRYCH, D., ROGALSKI, G., & ŁABANOWSKI, J. Weldability of high strength steel in underwater environment. *Welding International*, 30(3), 175-181. <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.937618>. 2016.

GAO, H.; JIAO, X.; ZHOU, C.; SHEN, Q.; YU, Y. Study on Remote Control Underwater Welding Technology Applied in Nuclear Power Station. *Procedia Engineering*, 15, 4988-4993. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.927>. 2011.

GARAŠIĆ, I., KRALJ, S., KOŽUH, Z., & PACAK, M. Analysis of Underwater Repair Technology on the Jack-Up Platform Spud Can. *Brodogradnja : Teorija i Praksa Brodogradnje i Pomorske Tehnike*, 61(2), 153-160. 2010.

GONÇALVES DE SOUZA. Análise exploratória das características metalúrgicas de soldas subaquáticas molhadas realizadas com eletrodos inoxidáveis austeníticos em aço estrutural. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. 2016.

GONZALEZ et al. Aportes teóricos y prácticos a la soldadura subacuática mojada. Anales de la Academia de Ciencias de Cuba. 2016

GUO N, FU Y, FENG J, DU Y, DENG Z, WANG M, TANG D. Classification of metal transfer mode in underwater wet welding. *Welding journal* 95:133-140. 2016.

GUO,N; Y. FU, Y. WANG, Y. DU, J. FENG, Z. DENG, “Effects of welding velocity on metal transfer mode and weld morphology in underwater flux-cored wire welding,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 239, pp. 103-112. <http://doi.org.10.1016/j.jmatprotec.2016.08.019>, 2017.

GYASI, E. A. Welding processes of metals for offshore environment: Underwater welding. <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/160103>. 2019

ISIKLAR, Y; GIRGIN, I. Numerical modelling of underwater welding. *Journal of Naval Science and Engineering*. 2011.

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.

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.

ŁABANOWSKI, J., FYDRYCH, D., & ROGALSKI, G. Underwater Welding—A Review. *Advances in Materials Sciences*, 8(3). <https://doi.org/10.2478/v10077-008-0040-3>. 2008.

ŁABANOWSKI, J. Development of under-water welding techniques. *Welding International*, 25(12), 933-937. <https://doi.org/10.1080/09507116.2010.540847>. 2011

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

MAROEUF, I; D.L. OLSON, M. EBERHART, G.R. EDWARDS. Hydrogen trapping in ferritic steel weld metal. *Int Mater Rev*, 47 (4), pp. 191-223. 2002.

MARTIN, M. et al. Influence of machining-induced martensite on hydrogen-assisted fracture of AISI type 304 austenitic stainless steel. *international journal of hydrogen energy*, Elsevier, v. 36, n. 17, p. 11195–11206, 2011.

MATSUSHITA e LIU. Hydrogen control in steel weld metal by means of fluoride additions in welding flux. *Weld J*, 79 (10) (2000), pp. 295-303. 2000

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.

MONTGOMERY, D C. *Design and analysis of experiments*. John Wiley & sons, 2008

MOSTAFA, N. B., e KHAJAVI, M. N. Optimization of welding parameters for weld penetration in FCAWN. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 16(nr 1-2). <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmetal.element.baztech-d100a65b-c756-4a80-aad6-5966df1e2054>. 2006.

MUHAYAT, N., MATIEN, Y. A., SUKANTO, H., SAPUTRO, Y. C. N., & TRIYONO. Fatigue life of underwater wet welded low carbon steel SS400. *Heliyon*, 6(2), e03366. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03366>. 2020.

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

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.

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

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

PLESSIS e TOIT. Reducing diffusible hydrogen contents of shielded metal arc welds through addition of flux-oxidizing ingredients. *J Mater Eng Perform*, 17, pp. 50-56. 2008.

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

RAMOS, J. Caracterização da estabilidade de aços inoxidáveis austeníticos sem adição de níquel; Dissertação de mestrado da universidade Federal do rio grande do sul. 2009.

SCOPUS, Scopus - Analyze search results | Signed in. 2024.

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.

RODRIGUEZ, A.; BRACARENSE, A. Fatigue crack growth rate in underwater wet welds: out of water evaluation. *Welding international*, 2017.

SANCHEZ-LOBO et al. Desenvolvimento de um arame tubular autoprottegido com níquel para soldagem subaquática molhada. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos materiais. 2022

SANCHEZ-OSIO et al., Underwater wet welding consumables for offshore applications Underwater wet welding consumables for offshore applications. 1993.

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 Oxyrutile Electrode for Wet Welding. *Welding Journal*, vol. 91, pp. 319-328, 2012.

SANTOS, V. R.; BRACARENSE, A. Q.; PESSOA, E. C. P.; MARINHO, R. R.; RIZZO, F. C.; JUNIOR, R.C.; MONTEIRO, M. J. Development of oxyrutile low alloy ferritic electrode for wet welding. *Journal of Materials Research and Technolgy*, vol. 21, pp. 1223-1247, 2022.

SHI et al. Porosity and Microstructure of Underwater Wet FCAW of Duplex Stainless Steel. 2017

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.

SWIERCZYNSKA et al. Diffusible hydrogen management in underwater wet self-shielded flux cored arc welding. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, n. 38. 2017.

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.

VASHISHTHA, P., et al. Problems encountered in underwater welding and remedies- a review. Materialstoday: PROCEEDINGS, 2022.

ZHANG et al. Heat input and metal transfer influences on the weld geometry and microstructure during underwater wet FCAW. 2016.

## **Apêndices**

## APÊNDICE A – Efeito dos fatores no coeficiente de variação da corrente KVI

### Efeito do tipo de arame

#### Análise de Variância

| Fonte | GL | SQ     | Seq | Contribuição | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------|----|--------|-----|--------------|----------|----------|---------|---------|
| Arame | 1  | 493,1  |     | 11,01%       | 493,1    | 493,1    | 4,20    | 0,048   |
| Erro  | 34 | 3987,1 |     | 88,99%       | 3987,1   | 117,3    |         |         |
| Total | 35 | 4480,2 |     | 100,00%      |          |          |         |         |

### Efeito da polaridade

#### Análise de Variância

| Fonte     | GL | SQ     | Seq | Contribuição | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-----------|----|--------|-----|--------------|----------|----------|---------|---------|
| Polaridad | 1  | 183,6  |     | 4,10%        | 183,6    | 183,6    | 1,45    | 0,236   |
| Erro      | 34 | 4296,6 |     | 95,90%       | 4296,6   | 126,4    |         |         |
| Total     | 35 | 4480,2 |     | 100,00%      |          |          |         |         |

### Efeito da condição

#### Análise de Variância

| Fonte     | GL | SQ   | Seq | Contribuição | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-----------|----|------|-----|--------------|----------|----------|---------|---------|
| Condición | 2  | 1284 |     | 28,67%       | 1284     | 642,16   | 6,63    | 0,004   |
| Erro      | 33 | 3196 |     | 71,33%       | 3196     | 96,84    |         |         |
| Total     | 35 | 4480 |     | 100,00%      |          |          |         |         |

## APÊNDICE B – Efeito dos fatores na frequência de curto circuito

### Efeito do tipo de arame

#### Análise de Variância

| Fonte | GL | SQ     | Seq | Contribuição | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------|----|--------|-----|--------------|----------|----------|---------|---------|
| Arame | 1  | 225,6  |     | 10,15%       | 225,6    | 225,63   | 3,84    | 0,058   |
| Erro  | 34 | 1997,5 |     | 89,85%       | 1997,5   | 58,75    |         |         |
| Total | 35 | 2223,2 |     | 100,00%      |          |          |         |         |

### Efeito da polaridade

#### Análise de Variância

| Fonte     | GL | SQ      | Seq | Contribuição | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-----------|----|---------|-----|--------------|----------|----------|---------|---------|
| Polaridad | 1  | 11,25   |     | 0,51%        | 11,25    | 11,25    | 0,17    | 0,680   |
| Erro      | 34 | 2211,90 |     | 99,49%       | 2211,90  | 65,06    |         |         |
| Total     | 35 | 2223,15 |     | 100,00%      |          |          |         |         |

### Efeito da condição

#### Análise de Variância

| Fonte    | GL | SQ   | Seq | Contribuição | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|----------|----|------|-----|--------------|----------|----------|---------|---------|
| Condição | 2  | 1124 |     | 50,55%       | 1124     | 561,95   | 16,87   | 0,000   |
| Erro     | 33 | 1099 |     | 49,45%       | 1099     | 33,31    |         |         |
| Total    | 35 | 2223 |     | 100,00%      |          |          |         |         |

## APÊNDICE C – Efeito dos fatores no reforço máximo do metal de solda

### Efeito do tipo de arame

#### Análise de Variância

| Fonte | GL | SQ      | Seq | Contribuição | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------|----|---------|-----|--------------|----------|----------|---------|---------|
| Arame | 1  | 0,0002  |     | 0,00%        | 0,0002   | 0,00025  | 0,00    | 0,989   |
| Erro  | 34 | 39,9635 |     | 100,00%      | 39,9635  | 1,17540  |         |         |
| Total | 35 | 39,9638 |     | 100,00%      |          |          |         |         |

### Efeito da polaridade

#### Análise de Variância

| Fonte     | GL | SQ     | Seq | Contribuição | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-----------|----|--------|-----|--------------|----------|----------|---------|---------|
| Polaridad | 1  | 2,905  |     | 7,27%        | 2,905    | 2,905    | 2,66    | 0,112   |
| Erro      | 34 | 37,059 |     | 92,73%       | 37,059   | 1,090    |         |         |
| Total     | 35 | 39,964 |     | 100,00%      |          |          |         |         |

### Efeito da condição

#### Análise de Variância

| Fonte     | GL | SQ    | Seq | Contribuição | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-----------|----|-------|-----|--------------|----------|----------|---------|---------|
| Condición | 2  | 24,13 |     | 60,39%       | 24,13    | 12,0675  | 25,16   | 0,000   |
| Erro      | 33 | 15,83 |     | 39,61%       | 15,83    | 0,4797   |         |         |
| Total     | 35 | 39,96 |     | 100,00%      |          |          |         |         |

## APÊNDICE D – Efeito dos fatores na largura do metal de solda

### Efeito do tipo de arame

#### Análise de Variância

| Fonte | GL | SQ Seq  | Contribuição | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------|----|---------|--------------|----------|----------|---------|---------|
| Arame | 1  | 0,0399  | 0,05%        | 0,0399   | 0,03987  | 0,02    | 0,892   |
| Erro  | 34 | 72,4960 | 99,95%       | 72,4960  | 2,13223  |         |         |
| Total | 35 | 72,5359 | 100,00%      |          |          |         |         |

### Efeito da polaridade

#### Análise de Variância

| Fonte     | GL | SQ Seq | Contribuição | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-----------|----|--------|--------------|----------|----------|---------|---------|
| Polaridad | 1  | 10,95  | 15,09%       | 10,95    | 10,947   | 6,04    | 0,019   |
| Erro      | 34 | 61,59  | 84,91%       | 61,59    | 1,811    |         |         |
| Total     | 35 | 72,54  | 100,00%      |          |          |         |         |

### Efeito da condição

#### Análise de Variância

| Fonte    | GL | SQ Seq  | Contribuição | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|----------|----|---------|--------------|----------|----------|---------|---------|
| Condição | 2  | 0,0151  | 0,02%        | 0,0151   | 0,00756  | 0,00    | 0,997   |
| Erro     | 33 | 72,5207 | 99,98%       | 72,5207  | 2,19760  |         |         |
| Total    | 35 | 72,5359 | 100,00%      |          |          |         |         |

## APÊNDICE E – Efeito dos fatores na penetração máxima do metal de solda

### Efeito do tipo de arame

#### Análise de Variância

| Fonte | GL | SQ     | Seq | Contribuição | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------|----|--------|-----|--------------|----------|----------|---------|---------|
| Arame | 1  | 1,120  |     | 2,28%        | 1,120    | 1,120    | 0,79    | 0,379   |
| Erro  | 34 | 47,990 |     | 97,72%       | 47,990   | 1,411    |         |         |
| Total | 35 | 49,110 |     | 100,00%      |          |          |         |         |

### Efeito da polaridade

#### Análise de Variância

| Fonte     | GL | SQ      | Seq | Contribuição | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-----------|----|---------|-----|--------------|----------|----------|---------|---------|
| Polaridad | 1  | 0,4579  |     | 0,93%        | 0,4579   | 0,4579   | 0,32    | 0,575   |
| Erro      | 34 | 48,6518 |     | 99,07%       | 48,6518  | 1,4309   |         |         |
| Total     | 35 | 49,1097 |     | 100,00%      |          |          |         |         |

### Efeito da condição

#### Análise de Variância

| Fonte     | GL | SQ    | Seq | Contribuição | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-----------|----|-------|-----|--------------|----------|----------|---------|---------|
| Condición | 2  | 26,82 |     | 54,60%       | 26,82    | 13,4079  | 19,85   | 0,000   |
| Erro      | 33 | 22,29 |     | 45,40%       | 22,29    | 0,6756   |         |         |
| Total     | 35 | 49,11 |     | 100,00%      |          |          |         |         |

## APÊNDICE F – Efeito dos fatores na diluição do metal de solda

### Efeito do tipo de arame

#### Análise de Variância

| Fonte | GL | SQ      | Seq | Contribuição | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------|----|---------|-----|--------------|----------|----------|---------|---------|
| Arame | 1  | 6,06    |     | 0,34%        | 6,06     | 6,059    | 0,12    | 0,735   |
| Erro  | 34 | 1768,69 |     | 99,66%       | 1768,69  | 52,020   |         |         |
| Total | 35 | 1774,75 |     | 100,00%      |          |          |         |         |

### Efeito da polaridade

#### Análise de Variância

| Fonte     | GL | SQ     | Seq | Contribuição | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-----------|----|--------|-----|--------------|----------|----------|---------|---------|
| Polaridad | 1  | 135,9  |     | 7,66%        | 135,9    | 135,88   | 2,82    | 0,102   |
| Erro      | 34 | 1638,9 |     | 92,34%       | 1638,9   | 48,20    |         |         |
| Total     | 35 | 1774,7 |     | 100,00%      |          |          |         |         |

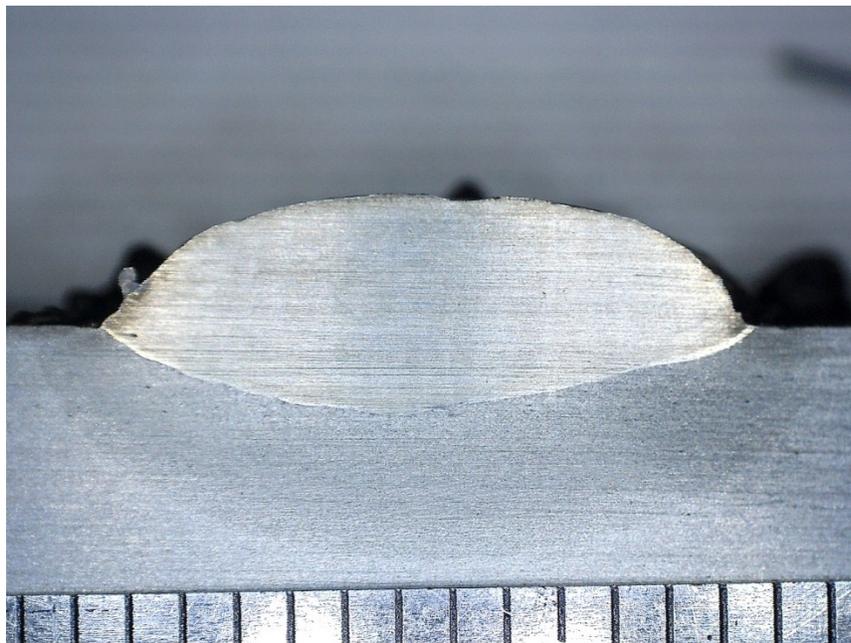
### Efeito da condição

#### Análise de Variância

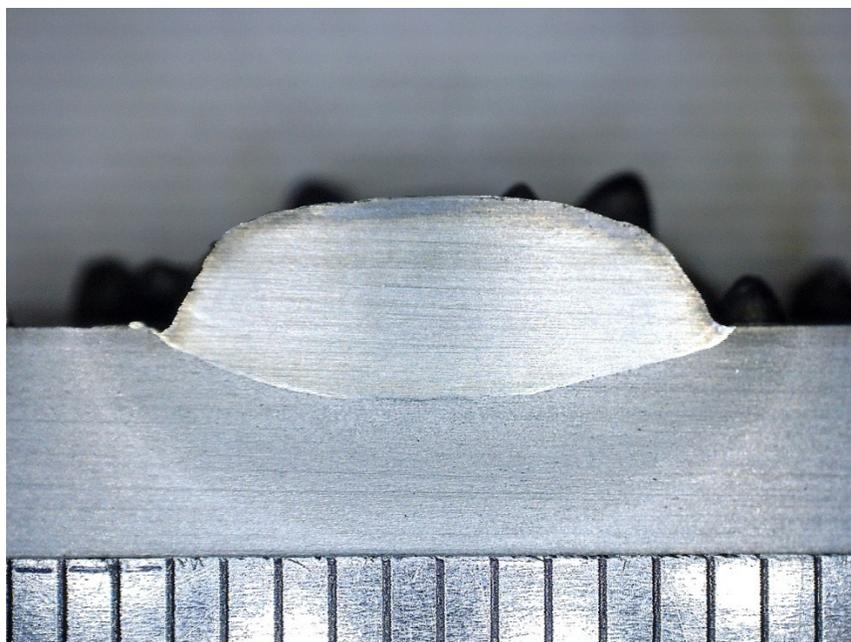
| Fonte    | GL | SQ     | Seq | Contribuição | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|----------|----|--------|-----|--------------|----------|----------|---------|---------|
| Condição | 2  | 101,5  |     | 5,72%        | 101,5    | 50,73    | 1,00    | 0,379   |
| Erro     | 33 | 1673,3 |     | 94,28%       | 1673,3   | 50,71    |         |         |
| Total    | 35 | 1774,7 |     | 100,00%      |          |          |         |         |

**APÊNDICE G – Seções transversais dos cordões de solda**

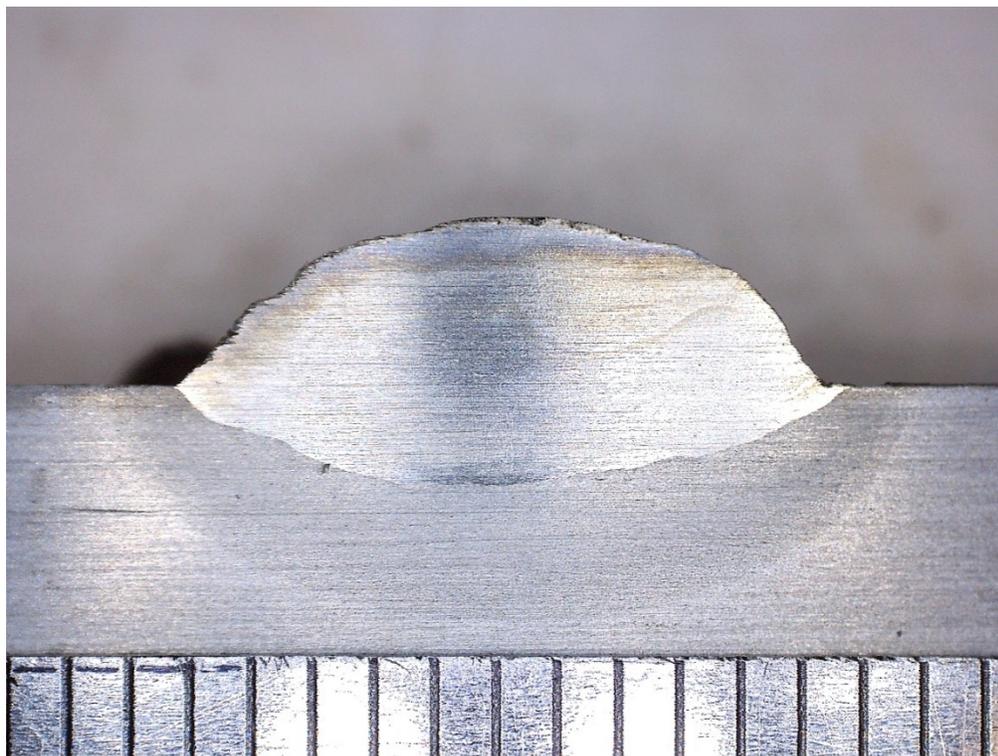
*NI ao AR em DCEP*



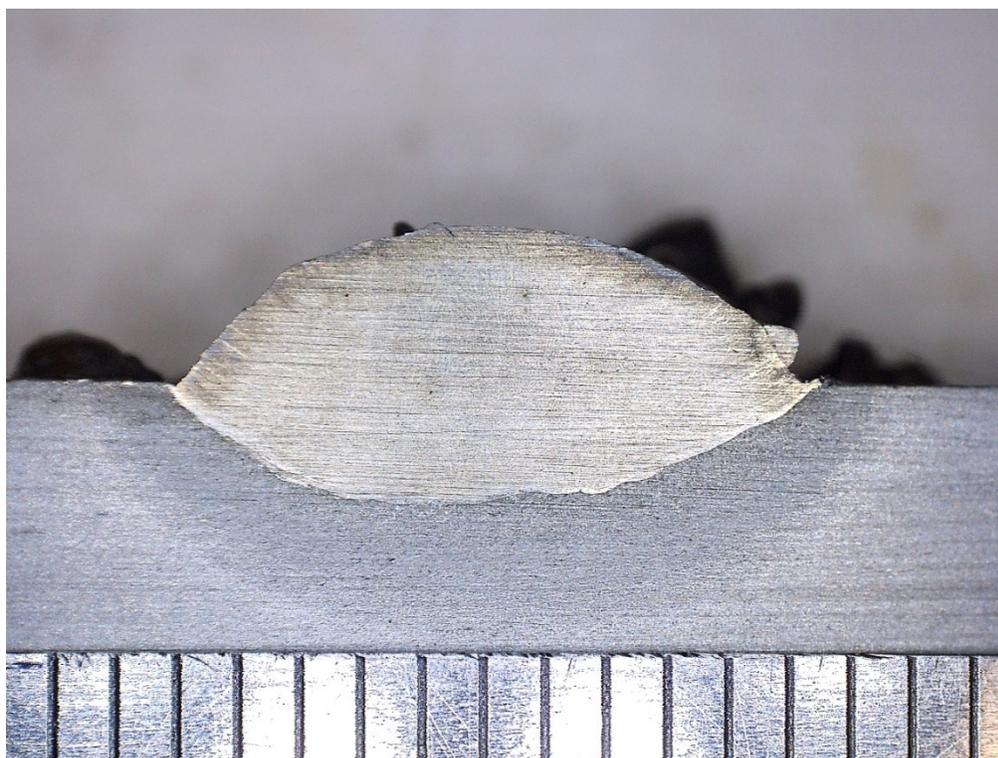
*NI ao AR em DCEN*



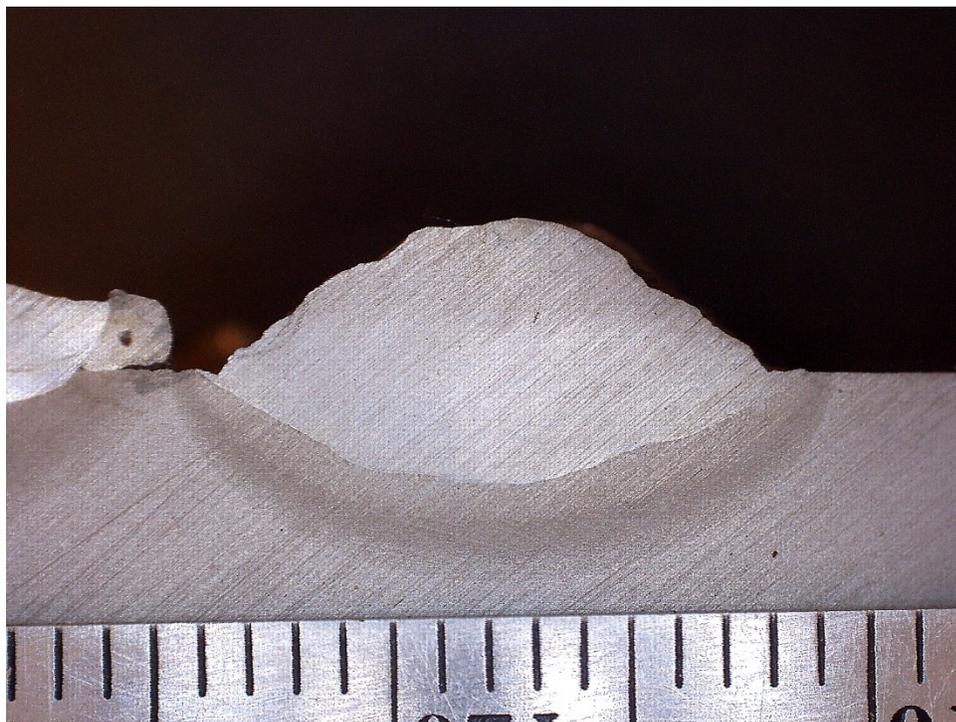
*N2 ao AR em DCEP*



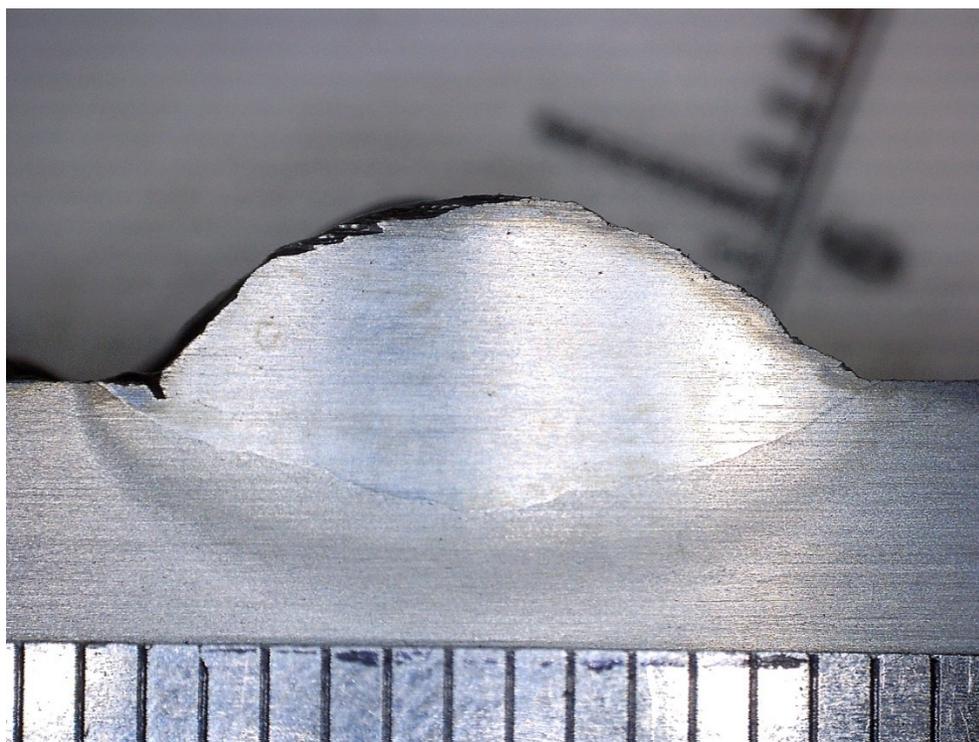
*N2 ao AR em DCEN*



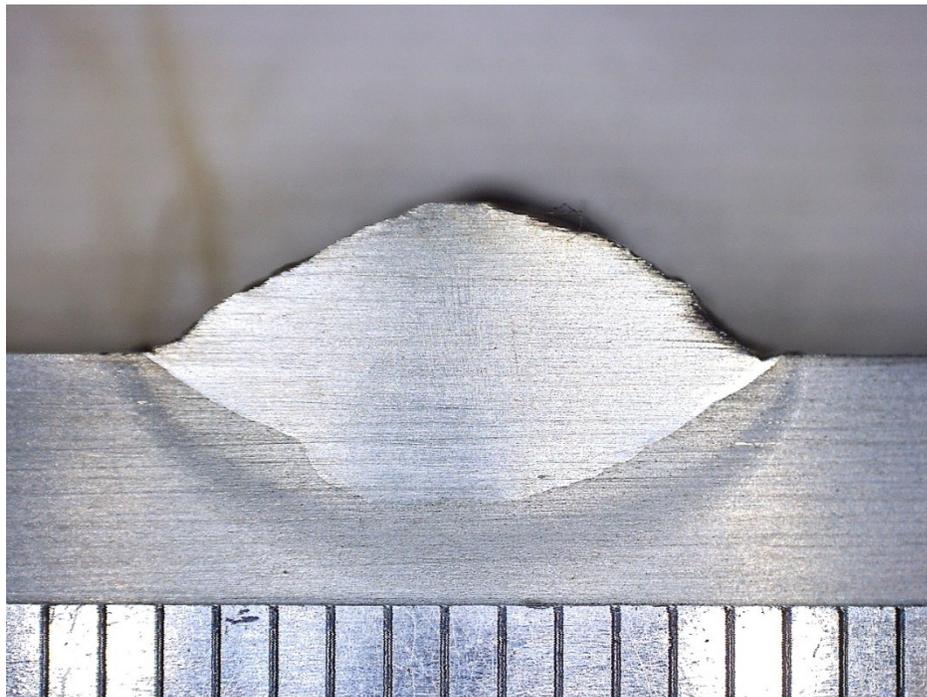
*N1 a 0,3 m em DCEP*



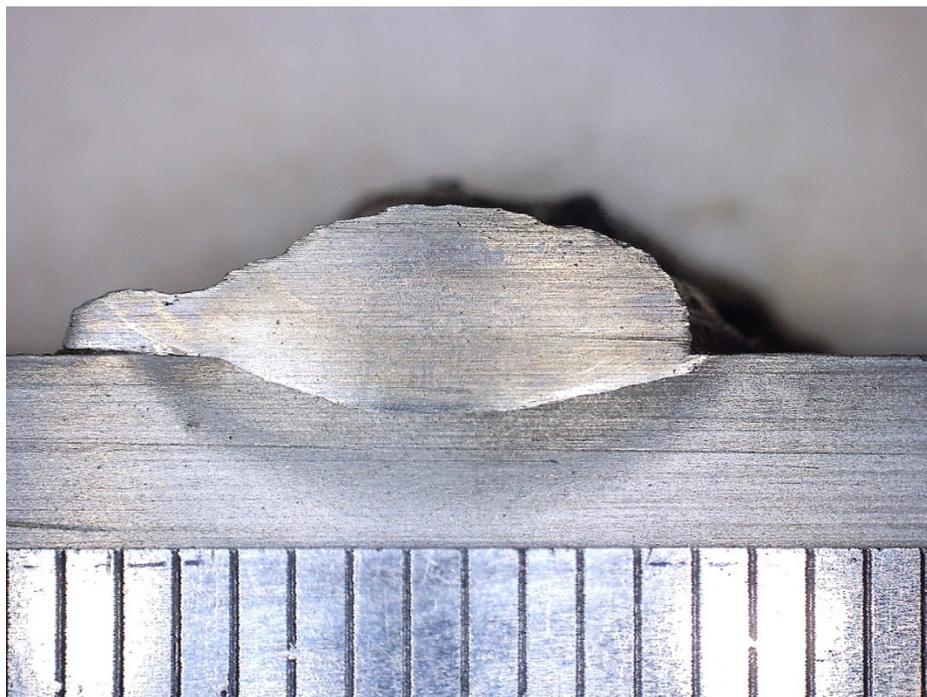
*N1 a 0,3 m em DCEN*



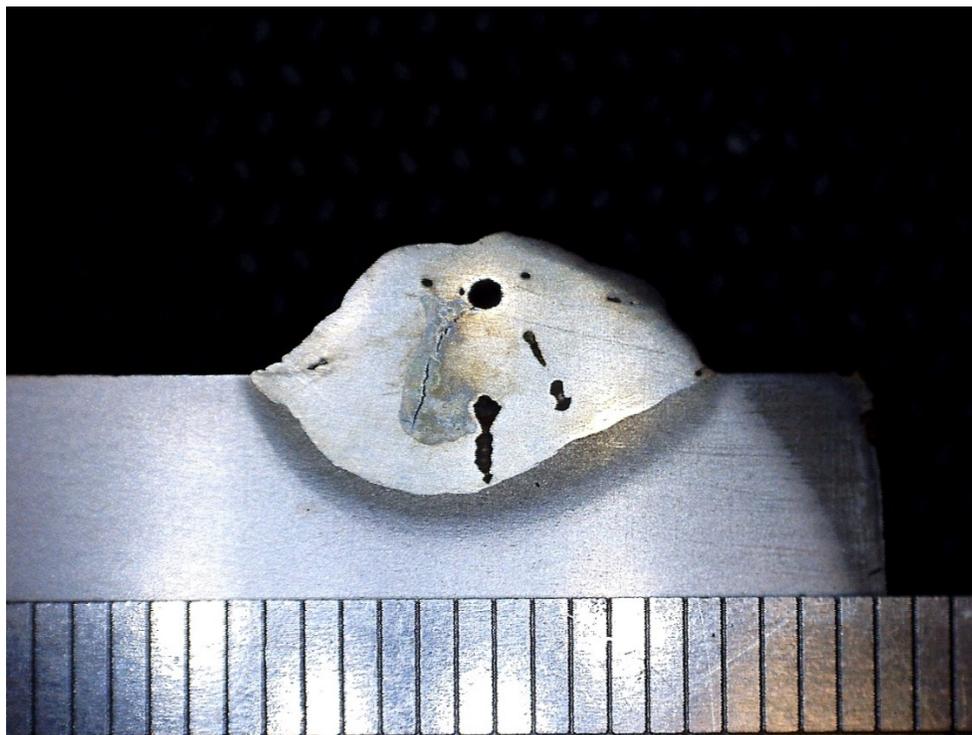
*N2 a 0,3 m em DCEP*



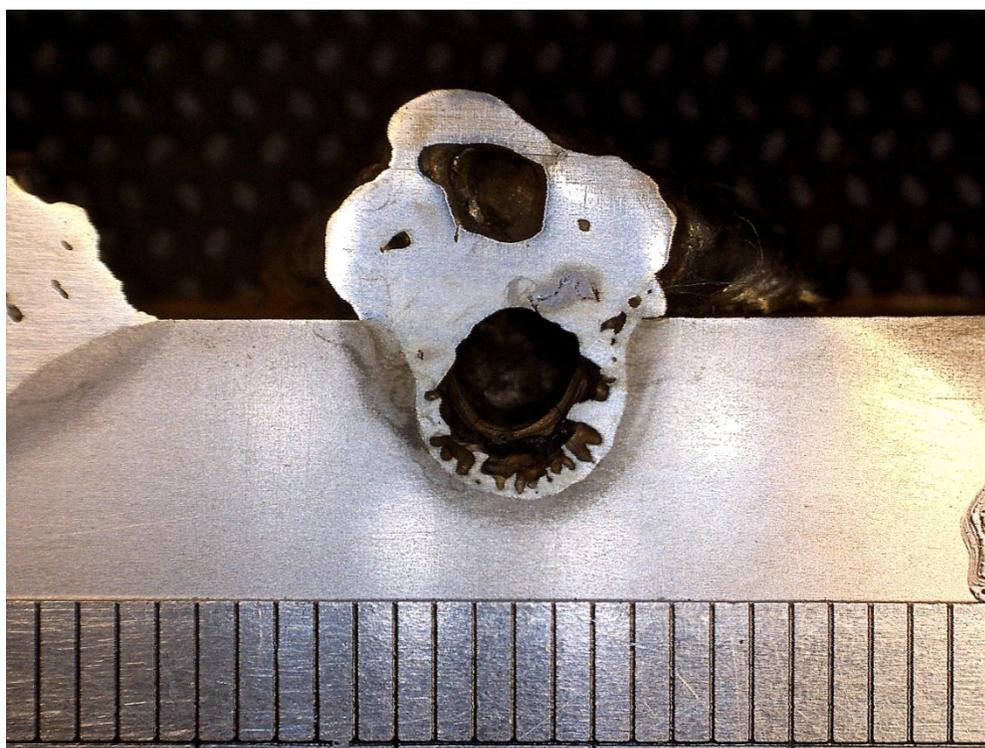
*N2 a 0,3 m em DCEN*



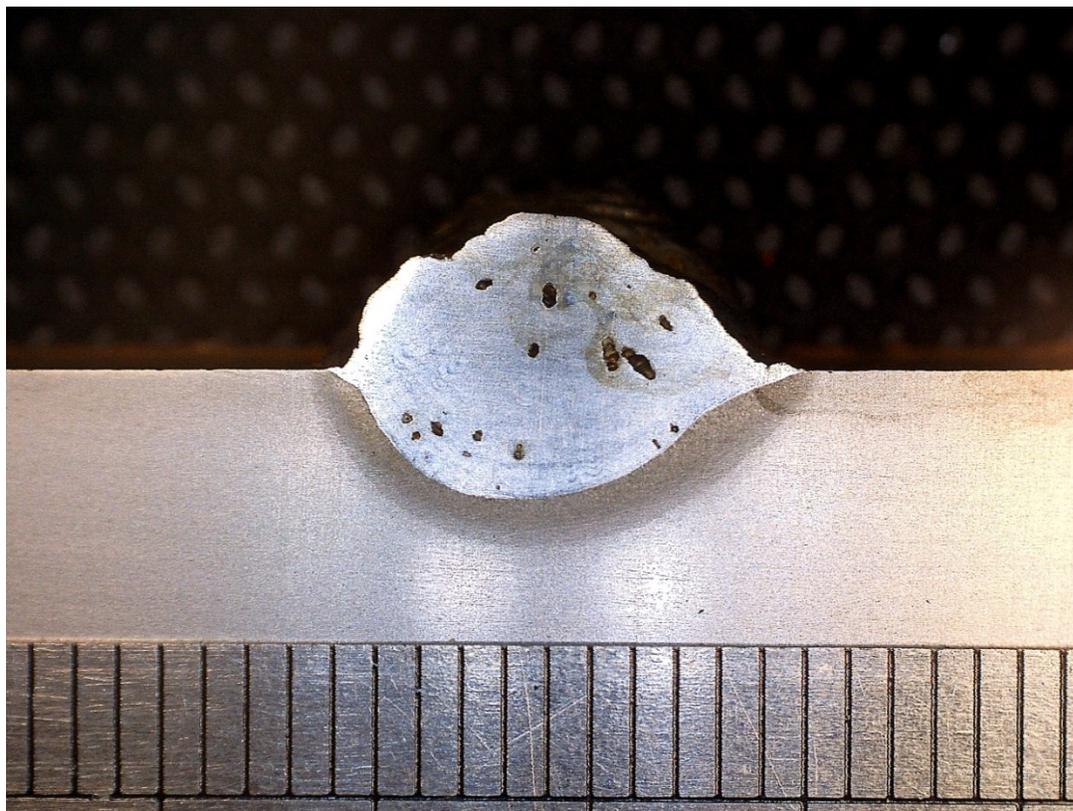
*N1 a 30 m em DCEP*



*N1 a 30 m em DCEN*



*N2 a 30 m em DCEP*



*N2 a 30 m em DCEN*

