

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
ENGENHARIA MECÂNICA**

JOÃO GABRIEL NUNES RODRIGUES

**APLICABILIDADE DA MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO
(MADA) POR CMT PARA PRODUÇÃO DE FLANGE DE AÇO PARA CONEXÃO
DE DESCARGA DE CAMINHÃO TANQUE DE CLORO DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA**

GOIÂNIA - GO

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome completo do autor: João Gabriel Nunes Rodrigues

Título do trabalho: **Aplicabilidade da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) por CMT para Produção de Flange de Aço para Conexão de Descarga de Caminhão Tanque de Cloro de Estação de Tratamento de Água**

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Lauriano Da Silva**, Usuário Externo, em 08/12/2025, às 10:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Demostenes Ferreira Filho, Professor do Magistério Superior**, em 08/12/2025, às 10:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Gabriel Nunes Rodrigues, Discente**, em 08/12/2025, às 11:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5841349** e o código CRC **179D1815**.

Referência: Processo nº 23070.043319/2025-68

SEI nº 5841349

JOÃO GABRIEL NUNES RODRIGUES

**APLICABILIDADE DA MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO
(MADA) POR CMT PARA PRODUÇÃO DE FLANGE DE AÇO PARA CONEXÃO
DE DESCARGA DE CAMINHÃO TANQUE DE CLORO DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Demostenes Ferreira Filho.

Coorientador: Me. Lucas Lauriano da Silva.

GOIÂNIA - GO

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Rodrigues, João Gabriel Nunes
APLICABILIDADE DA MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO
A ARCO (MADA) POR CMT PARA PRODUÇÃO DE FLANGE DE AÇO
PARA CONEXÃO DE DESCARGA DE CAMINHÃO TANQUE DE
CLORO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA [manuscrito] /
João Gabriel Nunes Rodrigues. - 2025.
XXXIII, 33 f.

Orientador: Prof. Dr. Demostenes Ferreira Filho; co-orientador
Lucas Lauriano da Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de
Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2025.

Inclui fotografias, abreviaturas, gráfico, tabelas.

1. MADA. 2. CMT. 3. Corrosão. 4. tubo flangeado. I. Filho,
Demostenes Ferreira, orient. II. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos oito dias do mês de dezembro do ano de 2025 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “Aplicabilidade de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) por CMT para Produção de Flange de Aço para Conexão de Descarga de Caminhão Tanque de Cloro de Estação de Tratamento de Água”, de autoria de João Gabriel Nunes Rodrigues, do curso de Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo Prof. Demostenes Ferreira Filho - orientador (EMC/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Prof. Gustavo Pereira da Silva (Unidade Perimetral/Unialfa), Prof. Daniel Souza (EMC/UFG) e Lucas Lauriano da Silva - coorientador (SANEAGO). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 9,6 (nove vírgula seis), tendo sido o TCC considerado APROVADO.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Demostenes Ferreira Filho, Professor do Magistério Superior**, em 08/12/2025, às 10:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Souza, Professor do Magistério Superior**, em 08/12/2025, às 10:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Pereira Da Silva, Usuário Externo**, em 08/12/2025, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Lauriano Da Silva, Usuário Externo**, em 08/12/2025, às 11:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5841279** e o código CRC **234D29FC**.

Dedico este trabalho aos meus pais,
Carlos e Sirlei, e ao meu irmão Henrique.

AGRADECIMENTOS

A Carlos e Sirlei, meus amados e queridos pais, agradeço por tudo o que fizeram por mim, desde o meu nascimento até a presente data. Sem o esforço de vocês e os inúmeros sacrifícios que fizeram, eu não seria capaz de enfrentar o longo e árduo caminho da graduação. Sem vocês eu não seria capaz de ingressar em uma universidade de qualidade como a UFG. Agradeço também ao meu irmão Henrique, pela amizade e companheirismo durante a minha formação.

Ao grupo de amigos OLE, composto por Bruno, Gabriel, Pedro Victor, Rafael e Vitor. Obrigado por trilharem esse caminho comigo durante a graduação. Agradeço pelo tempo juntos, pelas inúmeras risadas, pelo tempo de estudo juntos. Vocês foram fundamentais nesse período.

A minha melhor amiga Luisa, muito obrigado por tudo o que você fez por mim. Você serviu de inspiração para mim em diversos momentos, me aconselhando e servindo como porto seguro. Agradeço por ter me incentivado a realizar a iniciação científica que deu origem a este trabalho. Obrigado, do fundo do meu coração.

Ao meu orientador Demostenes, muito obrigado por esse período de trabalho juntos, que serviu de grande proveito para minha capacitação como engenheiro mecânico. Agradeço também aos professores Leonardo e Felipe. Obrigado pelos ensinamentos e por me instruir para o melhor caminho dentro do ambiente acadêmico.

Por fim, agradeço a Deus por me proteger e me dar a saúde necessária para concluir essa etapa da minha vida.

“A própria vida é uma prova de corridas, com um início e um fim. É o que aprendemos durante a corrida, e como aplicamos esse conhecimento, que determina se a nossa participação teve algum contributo de valor.”

(Ferdinand Porsche)

RESUMO

Componentes utilizados em estações de tratamento de água operam em ambientes com potencial de corrosão, podendo levar à sua deterioração e inutilização. Assim sendo, a exploração de processos com capacidade de fabricação de componentes com maior eficácia mostra-se cada vez mais necessária. Nesse contexto, este estudo avaliou a aplicabilidade da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), utilizando o processo Cold Metal Transfer (CMT), na produção de um tubo flangeado destinado à descarga de um caminhão tanque de cloro. Inicialmente, foram fabricados flanges com diferentes espaçamentos entre cordões e analisada a influência da vazão do gás de proteção na formação de poros. Em seguida, produziram-se o flange definitivo e um tubo para ensaios mecânicos, de corrosão e análise microestrutural, comparando-se os resultados com um componente MADA-GMAW e com um tubo convencional. Os resultados mostraram que o flange com espaçamento de 12 mm apresentou melhor integridade geométrica, enquanto a vazão de 20 L/min foi a mínima capaz de evitar poros internos. A análise microestrutural identificou ferrita e perlita nas regiões inferior e central, além de ferrita de widmanstätten na região superior. O tubo fabricado demonstrou limite de escoamento e resistência superiores aos obtidos por MADA-GMAW. Nos ensaios de corrosão, as amostras produzidas por CMT exibiram maior resistência quando comparadas as do tubo convencional e as MADA-GMAW. Conclui-se que o processo CMT é uma alternativa adequada para a fabricação de componentes destinados a ambientes corrosivos.

Palavras-chave: MADA, CMT, Corrosão, tubo flangeado

ABSTRACT

Components used in water treatment plants operate in potentially corrosive environments, which can lead to deterioration and failure. Therefore, the exploration of manufacturing processes capable of producing more effective components is becoming increasingly necessary. In this context, this study evaluated the applicability of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), using the Cold Metal Transfer (CMT) process, for the production of a flanged pipe intended for unloading a chlorine tanker truck. Initially, flanges were manufactured with different bead spacings, and the influence of the shielding gas flow rate on pore formation was analyzed. Subsequently, the final flange and a pipe were produced for mechanical and corrosion testing, as well as microstructural analysis; results were compared with a WAAM-GMAW component and a conventional pipe. The results showed that the flange with a 12 mm spacing exhibited better geometric integrity, while a flow rate of 20 L/min was the minimum required to prevent internal porosity. Microstructural analysis identified ferrite and pearlite in the lower and central regions, in addition to widmanstätten ferrite in the upper region. The manufactured pipe demonstrated superior yield strength and tensile strength compared to those obtained via WAAM-GMAW. In corrosion tests, samples produced by CMT exhibited higher resistance compared to both the conventional pipe and the WAAM-GMAW samples. It is concluded that the CMT process is a suitable alternative for manufacturing components intended for corrosive environments.

Keywords: WAAM, CMT, Corrosion, flanged pipe

APLICABILIDADE DA MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA) POR CMT PARA PRODUÇÃO DE FLANGE DE AÇO PARA CONEXÃO DE DESCARGA DE CAMINHÃO TANQUE DE CLORO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

João Gabriel Nunes Rodrigues

Abstract— Components used in water treatment plants operate in potentially corrosive environments, which can lead to deterioration and failure. Therefore, the exploration of manufacturing processes capable of producing more effective components is becoming increasingly necessary. In this context, this study evaluated the applicability of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), using the Cold Metal Transfer (CMT) process, for the production of a flanged pipe intended for unloading a chlorine tanker truck. Initially, flanges were manufactured with different bead spacings, and the influence of the shielding gas flow rate on pore formation was analyzed. Subsequently, the final flange and a pipe were produced for mechanical and corrosion testing, as well as microstructural analysis; results were compared with a WAAM-GMAW component and a conventional pipe. The results showed that the flange with a 12 mm spacing exhibited better geometric integrity, while a flow rate of 20 L/min was the minimum required to prevent internal porosity. Microstructural analysis identified ferrite and pearlite in the lower and central regions, in addition to widmanstätten ferrite in the upper region. The manufactured pipe demonstrated superior yield strength and tensile strength compared to those obtained via WAAM-GMAW. In corrosion tests, samples produced by CMT exhibited higher resistance compared to both the conventional pipe and the WAAM-GMAW samples. It is concluded that the CMT process is a suitable alternative for manufacturing components intended for corrosive environments.

Index Terms— CMT, WAAM, Corrosion, flanged pipe.

I. INTRODUÇÃO

ÁGUA é considerado o recurso natural mais importante no planeta. A sua utilização vai desde o consumo humano para a satisfação das necessidades fisiológicas até o emprego em grandes indústrias onde desempenha papel fundamental na produção, como por exemplo a indústria agropecuária [1].

Esse trabalho foi apoiado pelo Fundo de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás através do projeto de nº 202410267000182 e também pelo Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF) da Universidade Federal de Goiás (UFG) com apoio dos técnicos Fleide Wiliam Rodrigues Alves, João Bosco da Cunha e Renata Rodrigues Alves. Agradecemos ao centro de excelência em metrologia SENAI-ZEISS e a empresa Saneamento de Goiás S/A pelo apoio nas etapas de análise e ensaios.

RODRIGUES, J. G. N. é graduando do curso de bacharelado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Goiás (UFG).

FILHO, D. F. é professor da carreira de magistério superior na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG).

DA SILVA, L. L. é egresso do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC) da Universidade Federal de Goiás (UFG). Atualmente é Engenheiro Mecânico na Companhia Saneamento de Goiás S/A (SANEAGO).

A maior parte do Planeta Terra é composto por água, representando cerca de 70% da área da superfície [1], entretanto, apenas 2,5% dessa água é caracterizada como pura para consumo humano [2]. Para garantir os critérios necessários para utilização, o tratamento prévio garantindo a segurança para uso e também a saúde ecológica é requerido [3].

As Estações de Tratamento de água (ETA) se inserem como o principal agente responsável por lidar com o saneamento básico na sociedade. Dentre as diversas substâncias químicas utilizadas por esses agentes para o tratamento de água, o Cloro se destaca devido a sua eficácia no controle de agentes patogênicos ajudando no controle de proliferação de doenças [4].

O aço é um importante material, utilizado na fabricação de tubulações e conexões destinadas ao transporte de fluidos em ETAs [5], entretanto o Cloro utilizado no sistema de desinfecção pode acarretar danos nas tubulações devido a ação corrosiva que seus subprodutos podem gerar no ambiente de operação.

Devido as condições de operação em ambientes corrosivos, os componentes estruturais acabam sofrendo desgaste prematuro com possibilidade de falha, podendo vir a causar interrupção temporária da operação na Planta de tratamento de água o que pode ocasionar prejuízo diretamente a milhões de pessoas.

Levando isso em consideração, a busca por alternativas eficazes de processos de fabricação tem se intensificado cada vez mais. Com isso, a Manufatura Aditiva (MA) surge como uma alternativa em relação aos processos de fabricação já enraizados na indústria devido a sua eficácia comparada a processos subtrativos em relação ao gasto de materiais, uso de energia e tempo de produção, além de permitir a liberdade no design de componentes [6].

Dentre os processos de MA, a Manufatura Aditiva por deposição a Arco (MADA) tem ganhado grande destaque, devido a capacidade de produção com altas taxas de deposição de material, efetividade de produção de componentes em larga escala e utilização de equipamentos e consumíveis com menor custo comparados a outros processos de MA [7].

O *Cold Metal Transfer* (CMT), processo derivado do *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) convencional, surgiu como uma alternativa aos demais processos por proporcionar a fabricação de componentes com a estabilidade do arco além de reduzir o aporte térmico, diminuindo tensões residuais e também a quantidade de respingos durante a sua execução [8].

Diante da necessidade pela busca de alternativas para a melhoria dos componentes empregados nas instalações de

plantas de tratamento de água e pelo processo CMT se mostrar como uma alternativa viável no mercado. O objetivo desse trabalho é avaliar a aplicabilidade do processo CMT na produção de um tubo flangeado destinado a ser utilizado na descarga de um caminhão tanque de cloro. Afim de validar essa aplicação, ensaios mecânicos e de corrosão por submersão foram realizados. Por fim, os resultados obtidos foram comparados com os reportados na literatura para componentes fabricados utilizando o processo MADA-GMAW e processos de fabricação convencionais [9].

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A. Manufatura Aditiva.

A Manufatura Aditiva, é um processo de fabricação aditivo, ou seja, ocorre a deposição de material em camadas sucessivas, diferentemente de processos de fabricação subtrativos, onde ocorre a retirada de material até que a forma desejada seja atingida [10]. O processo permite a integração de elementos de automação, onde o objeto a ser fabricado é previamente modelado tridimensionalmente através de um software CAD, permitindo assim a fabricação de objetos com geometria complexa, e a partir do modelo é realizada a fabricação do componente [11].

Posterior a modelagem 3D do componente, em geral, os processos de Manufatura Aditiva seguem para a etapas de pré-processamento como orientação da parte, geração de suporte e também a definição dos parâmetros de processo como por exemplo o preenchimento, altura da camada, parâmetros de potência, velocidade de alimentação do material e velocidade de movimento do mecanismo de deposição [12]. Somente após uma definição concreta dessas etapas, ocorre o início do processo de deposição.

A Deposição com Energia Direcionada (DED) é um processo de Manufatura Aditiva que utiliza uma fonte de energia, seja ela cinética ou térmica, para realizar a fusão do material a ser depositado [13]. O processo DED é dividido quando ao tipo de alimentação do material ou de acordo com o tipo de energia empregada para realizar a fusão do material. A classificação do processo DED pode ser visualizada na Fig.1.

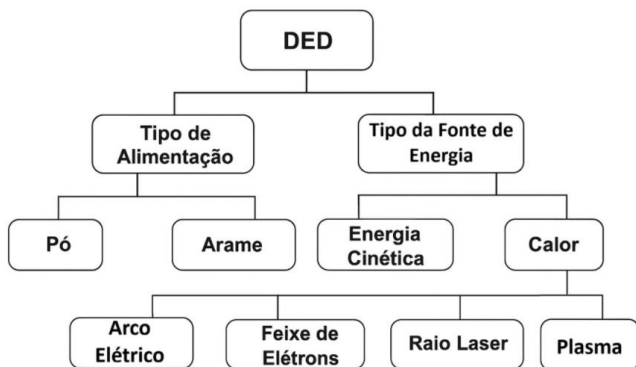


Fig. 1: Classificação do processo DED. Adaptado [13]

O DED possui como vantagens associadas à sua aplicação, a versatilidade de materiais que podem ser empregados, uma alta taxa de deposição, fabricação de peças com grande volume

além de ser um processo comumente empregado na produção de componentes metálicos como Aço com baixo carbono, Aço Inoxidável, Alumínio, Titânio e também ligas de Níquel [14].

B. Manufatura aditiva por deposição a arco (MADA).

A Manufatura Aditiva por deposição a arco (MADA) é um processo de Manufatura Aditiva do tipo DED. Nesse processo, é utilizada um arame metálico como material base a ser depositado e um arco elétrico como fonte de energia para realizar a fusão do material de adição [15].

O processo MADA tem ganhado bastante destaque dentro dos processos de Manufatura Aditiva pois, o mesmo consegue produzir componentes com uma alta taxa de produção, com uma utilização altamente eficaz do material base (cerca de 100%) reduzindo perdas de material, equipamentos com custo relativamente baixos comparados a outros processos além de proporcionar uma melhor fusão das camadas depositadas [16].

O MADA pode ser dividido em 3 tipos principais derivados de processos convencionais de soldagem [17]. A Fig.2 mostra essa divisão.

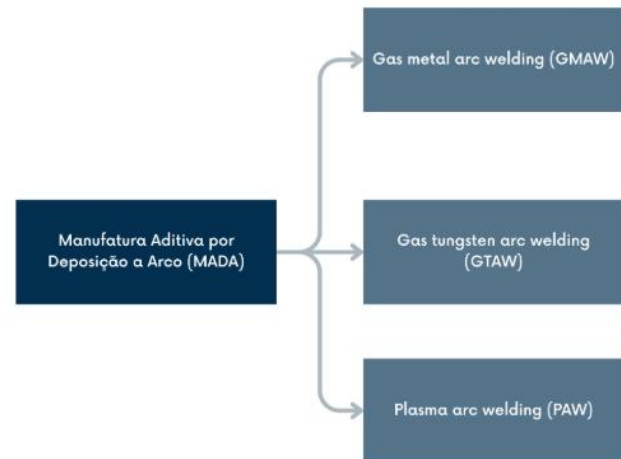


Fig. 2: Processos MADA. Adaptado [17].

C. Cold Metal Transfer (CMT).

O Cold Metal Transfer (CMT) foi desenvolvido e patentiado pela empresa austríaca Fronius em 2004. O processo é uma variante do Gas Metal Arc Welding (GMAW) e combina características tanto do processo GMAW convencional, quanto do GMAW pulsado [18].

A Fig.3 mostra uma representação do processo enquanto a Fig.4 mostra o gráfico da corrente e tensão durante o processo. O mecanismo do processo possui 3 fases distintas e ocorre da seguinte maneira [19]:

- No “Período de pico”, onde a corrente atinge o seu maior valor, o arco elétrico entre a ponta do arame e o substrato é aberto. Nessa fase, ocorre o aumento de temperatura responsável pela fusão do arame.
- Após isso, ocorre o chamado “Período base”. Nessa fase, a corrente do processo é diminuída a fim de manter a integridade da gota formada, evitando que a mesma se desprenda da ponta do arame.
- Por fim, após o período base, ocorre a fase de “Curto-Circuito”. Nessa fase, o arame em

movimento em direção ao substrato entra em contato com a poça de fusão através da gota de material presente em sua ponta e o arco elétrico é extinto. Devido a esse contato, a tensão se aproxima de zero e um sinal é enviado até o mecanismo de alimentação do arame, responsável por realizar o movimento de retração do arame. Durante o movimento de retração, devido a forças inercias e ação da gravidade, a gota na ponta do arame se desprende e então é depositada na poça de fusão.

- Após o fim das 3 etapas, o arco elétrico é novamente aberto e o processo ocorre ciclicamente.



Fig. 3: Representação do processo CMT [18].

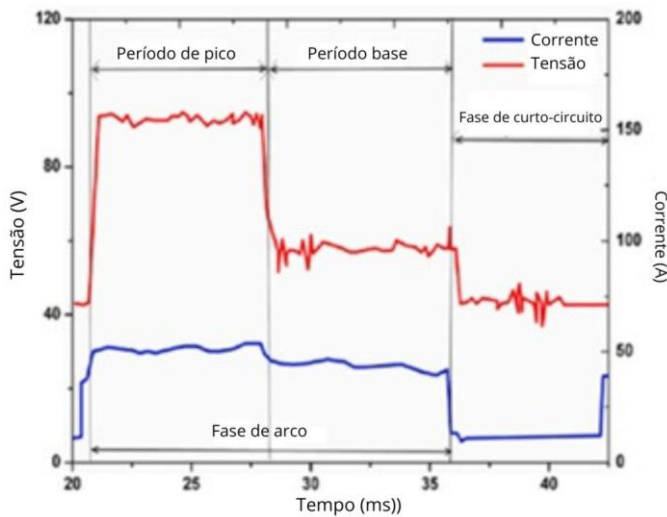


Fig. 4: Gráfico da corrente e tensão do processo CMT. Adaptado [18].

Devida a baixa corrente durante a etapa de curto-circuito, o aporte térmico envolvido no processo é baixo. Outras características relacionadas ao processo são a ausência de forças magnéticas, arco elétrico estável e também, a energia consumida no processo é de cerca de 35% da energia consumida utilizando o processo GMAW convencional [20]. O baixo aporte térmico é responsável diretamente por diminuir a quantidade de respingos que ocorrem durante o processo de deposição além de proporcionar uma melhoria no acabamento superficial de componentes fabricados [21].

D. Corrosão.

A Corrosão é um processo que ocorre em materiais, normalmente em metais e suas ligas, gerando a deterioração dos mesmos através de reações químicas ou físico-químicas que ocorre entre o material e o meio de trabalho em que está inserido [22]. Essa interação pode estar aliada diretamente ou não a esforços mecânicos e é prejudicial ao funcionamento do

material devido a modificações estruturais ou até mesmo químicas que o material pode vir a sofrer.

O processo de corrosão ocorre devido a uma resposta natural de conversão do material metálico para o estado em que o mesmo é encontrado na natureza. Quando o minério é extraído, para transforma-lo em material metálico, é necessário o emprego de energia através dos processos de fabricação. Ao entrar em contato com o ambiente, o material metálico sofre reações que tendem a retorná-lo para o seu estado original, como por exemplo o Ferro que ao sofrer corrosão forma como resultado primário o Oxido Férreo ($Fe(OH)_3$) conhecido popularmente como Hematita, sendo esse o minério de ferro mais comum na natureza [23].

As principais formas de corrosão em materiais metálicos (Fig.5) são [22]:

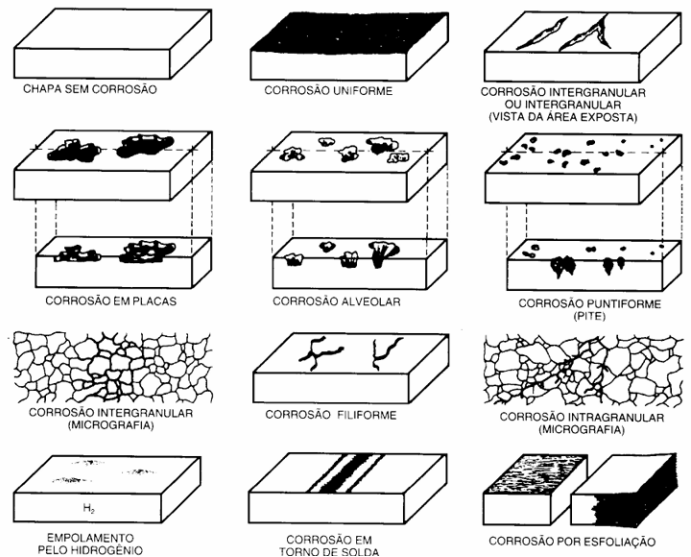


Fig. 5: Principais formas de corrosão [22].

- **Uniforme:** A corrosão Uniforme, como o próprio nome diz, ocorre de maneira uniforme ao longo da superfície do material, gerando perda semelhante de espessura em todos os pontos ao longo da extensão, sendo esse tipo de corrosão a responsável pela maior perda de material.
- **Intergranular:** A corrosão Intergranular ocorre no contorno de grão na rede cristalina do material.
- **Em Placas:** Diferentemente da Uniforme, a corrosão Em Placas ocorre em áreas localizadas ao longo do material formando erosões na superfície.
- **Alveolar:** Na corrosão Alveolar ocorre erosões que possuem o fundo com formato arredondado.
- **Puntiforme:** Também conhecida como corrosão por Pites, a corrosão Puntiforme ocorre formando erosões localizadas com formato angular. Diferentemente da corrosão alveolar, as erosões normalmente possuem profundidade com dimensão maior que o diâmetro.
- **Filiforme:** A corrosão Filiforme ocorre formando filamentos de largura fina e sem profundidade considerável.

- **Intragranular:** Na corrosão Intragranular, assim como a Intergranular, ocorre na rede cristalina do material através dos grãos.
- **Empolamento por Hidrogênio:** A corrosão por Empolamento por Hidrogênio ocorre devido a difusão de moléculas de Hidrogênio em regiões de descontinuidade do material, formando bolhas nas superfícies.
- **Em torno de Solda:** Corrosão que ocorre em volta de cordão de solda.
- **Por Esfoliação:** A corrosão por Esfoliação ocorre resultando no descolamento de placas de material paralelamente a superfície de material.

O aço é um metal com uma grande susceptibilidade a corrosão. Ao entrar em contato com o ambiente, a superfície de componentes reage, resultando na formação de óxidos de ferro e também de hidróxidos como é reportado por Balasooriya [24].

Componentes fabricados utilizando aço tendem a apresentar formas de corrosão variada de acordo com a literatura. Marques [25] realiza um levantamento bibliográfico acerca do comportamento de corrosão em componentes metálicos fabricados por Manufatura Aditiva por deposição a arco. Em seu trabalho, ele relata diferentes formas de corrosão em componentes fabricados em aço, como formação de óxidos, corrosão puntiforme e também por esfoliação. Das [26] em seu trabalho, investiga o comportamento corrosivo de um revestimento de ER70S-6 aplicado em um substrato feito utilizando uma liga de alumínio, reporta a presença de corrosão por Pitting. Dong [27] também relata a presença de corrosão por Pitting em amostras extraídas de um tubo ovalado fabricado utilizando o arame ER70S-6.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Materiais.

Para a realização deste trabalho utilizou-se uma fonte de soldagem FRONIUS TPS 400i com modo de transferência CMT. A fonte foi integrada a um manipulador robótico Yaskawa Motoman HP 20D de maneira a automatizar o processo de fabricação. O manipulador utiliza um controlador do tipo DX 100. A Fig.6 mostra o espaço de trabalho (Conjunto – Fonte de soldagem + Manipulador robótico + Cilindro de gás de proteção + Mesa de trabalho).

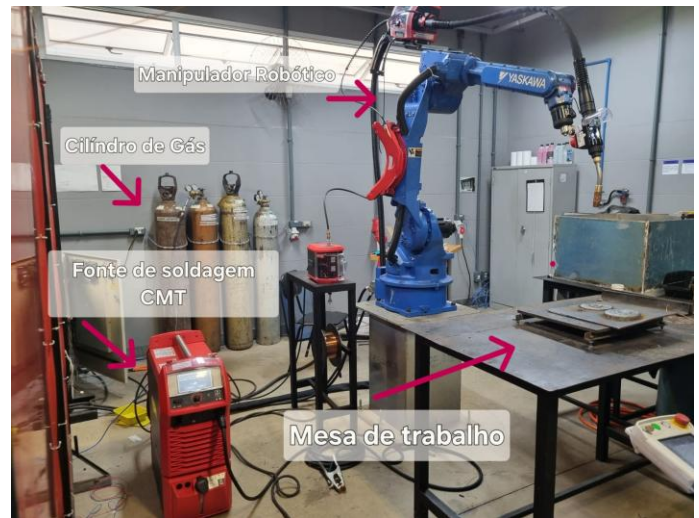


Fig. 6: Espaço de trabalho.

Os materiais consumíveis utilizados foram o material de deposição AWS A5.18 ER70S-6 com 1,2 mm de diâmetro. A composição química do arame pode ser visualizada na Tab.1 enquanto as suas propriedades mecânicas podem ser visualizadas na Tab.2.

Tab. 1: Composição química do arame ER70S-6. Sumig (2019).

Elemento	Mínimo %	Máximo
C	0,06	0,15
Mn	1,40	1,85
Si	0,80	1,15
S	-	0,035
P	-	0,025
Cr	-	0,15
Ni	-	0,15
Mo	-	0,15
V	-	0,03
Cu	-	0,50

Tab. 2: Propriedades mecânicas do arame ER70S-6. Sumig (2019).

Limite de Ruptura (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Alongamento (%)	Resistência ao impacto (CV)
≥ 420	≥ 500	28,4	≥ 27J

Foi utilizada uma mistura de Argônio e Dióxido de Carbono (CO₂) como gás de proteção nas concentrações de 85% e 15% respectivamente. A vazão utilizada para a fabricação dos flanges foi de 30 L/min e foi utilizado um tempo de pré-gás de 1,2 segundos com um tempo de resfriamento entre a deposição de cada camada de 100 segundos.

B. Métodos

1) Formato da peça a ser produzida.

O componente utilizado como base para o trabalho, trata-se de um tubo flangeado da descarga de um caminhão tanque de

cloro que atua em uma planta de tratamento de água em Goiânia pela empresa Saneamento de Goiás (SANEAGO). O tubo é composto por aço carbono e possui 375 mm de comprimento. Como o objetivo do trabalho é avaliar a aplicabilidade do processo CMT na produção do componente, foi considerada a produção do flange e do tubo de maneira separada para a realização dos testes avaliativos. A Fig.7 contém uma representação do tubo.

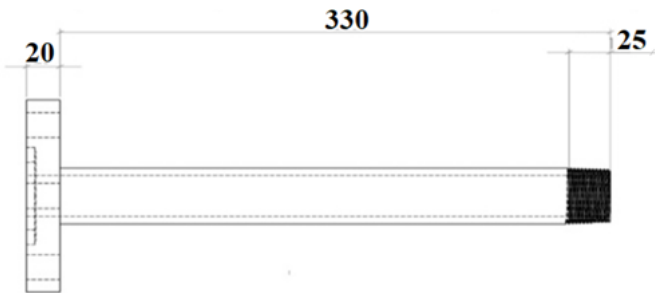


Fig. 7: Dimensões do tubo flangeado [9].

2) Parâmetros de deposição.

Em relação aos parâmetros do processo, foi utilizada uma distância bico de contato-peça de 16 mm. Para a velocidade de movimento da tocha foi adotado o valor de 20 cm/min. Já em relação ao parâmetro de seleção na fonte CMT foi selecionado o valor da velocidade de alimentação de 3,2 m/min, sendo esse valor próximo ao utilizado por Silva [9] que foi validado por meio de ensaios, atingindo os requisitos para a operação em indústria com valores dentro dos estabelecidos na norma ABNT NBR 5590 [28] que estabelece os requisitos mínimos de funcionamento para tubos fabricados em aço carbono. Visando manter resultados satisfatórios em relação a esses requisitos, optou-se por manter um valor próximo ao utilizado. Devido ao funcionamento por lei sinérgica, com base na velocidade de alimentação selecionada, a fonte estabeleceu um valor de 120 A para a corrente e 13,6 V para a tensão. Os valores dos parâmetros podem ser visualizados na Tab.3.

Tab. 3: Parâmetros empregados no processo.

Corrente Elétrica	120 A
DBCP	16 mm
Velocidade de Alimentação do Arame	3,2 m/min
Velocidade de movimento da tocha	20 cm/min
Tensão	13,6 V

3) Fabricação Preliminar.

Na etapa preliminar, foi realizada a fabricação de dois espécimes com o formato do flange. Os flanges foram fabricados a partir da deposição de 10 camadas de material e como dimensões, foi considerado um diâmetro interno de 20 mm e um diâmetro externo de 115 mm. Considerando essas dimensões como fixas, os 2 flanges foram fabricados variando o espaçamento entre os cordões circulares, sendo um espaçamento com o valor de 12 mm e o outro com o valor de 9 mm.

Para auxiliar durante o processo de programação da trajetória do manipulador, foi realizado o esboço de cada flange com as respectivas dimensões e espaçamentos utilizando o software de modelagem 3D Inventor. Os esboços foram utilizados como gabarito para a programação que ocorreu de forma manual ponto a ponto. Foram considerados 8 pontos em cada linha de cordão para que a interpolação que ocorre a partir do movimento circular do robô seja a mais precisa possível. A Fig.8 e Fig.9 mostram a representação dos esboços utilizados como gabarito.

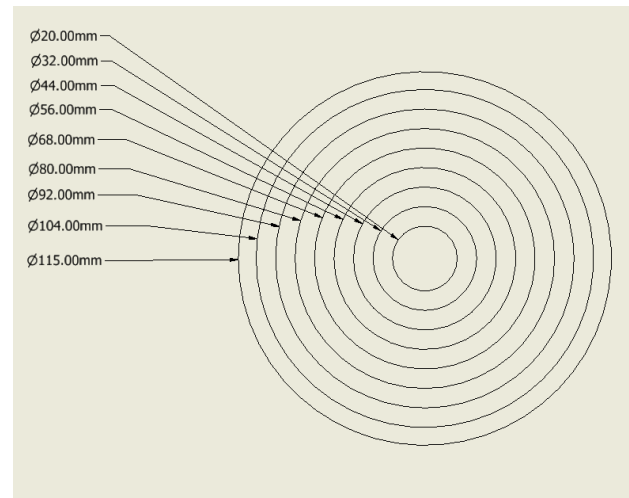


Fig. 8: Gabarito do flange com espaçamento de 12 mm.

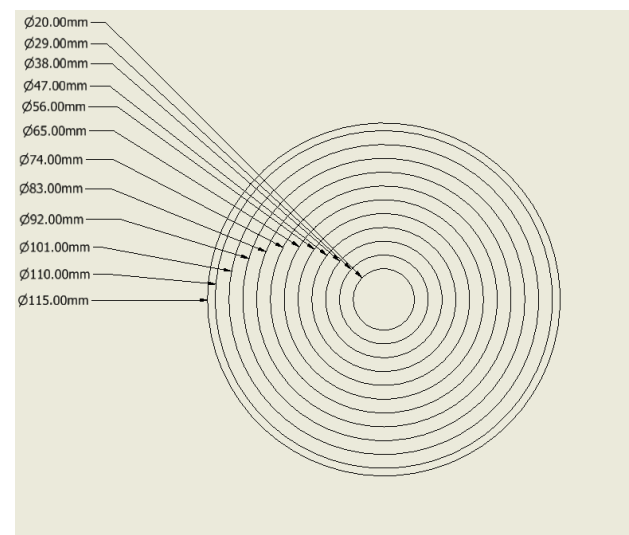


Fig. 9: Gabarito do flange com espaçamento de 9 mm.

Após a fabricação dos flanges, foi realizada uma análise qualitativa a fim de determinar qual dos dois apresentaram acabamento homogêneo sem a presença de defeitos externos consideráveis e também geometria plana. O flange que teve um melhor enquadro dentro desses critérios foi considerado como padrão a ser seguido.

4) Análise da vazão do gás de proteção e fabricação do tubo.

Previamente a fabricação do tubo, foi realizada a análise da influência da vazão do gás de proteção no surgimento de

defeitos internos durante a fabricação. Para isso, foram fabricados 5 espécimes de formato cilíndricos. O diâmetro interno e externo possui o valor de 24,3 mm e 40 mm respectivamente e foram fabricados com a deposição de 10 camadas de material.

Os parâmetros empregados na fabricação dos espécimes são os mesmos presentes na Tab.3, entretanto, foram utilizadas vazões de gás de proteção diferentes para cada espécime. Foi adotado um intervalo entre 10 L/min e 30 L/min com um espaçamento de 5 L/min, sendo assim, foram fabricados espécimes com 10 L/min, 15 L/min, 20 L/min, 25 L/min e 30 L/min.

Posteriormente a fabricação dos espécimes, foram retirados um corpo de prova de 10 mm de espessura de cada espécime utilizando uma cortadora metalográfica FORTEL CF III. Após isso, foi realizada a tomografia de cada amostra a fim de quantificar a presença de poros através da máquina de tomografia BOSELLO SRE MAX 80-150 da empresa alemã ZEISS. A Fig.10 e Fig.11 mostram a representação da retirada do corpo de prova nos espécimes e também a máquina de tomografia utilizada respectivamente.

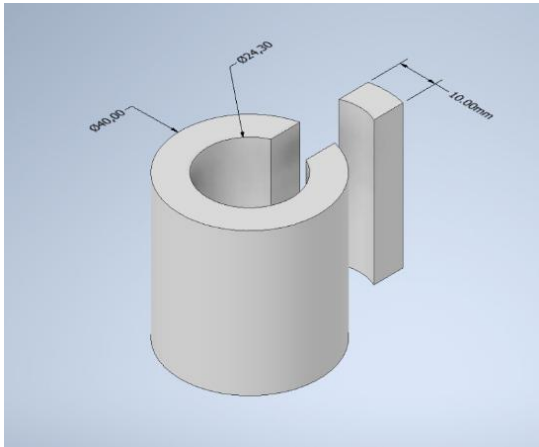


Fig. 10: Representação do corte realizado.



Fig. 11: BOSELLO SRE MAX 80-150.

Após a análise realizada, prosseguiu-se com a fabricação do tubo para a realização do ensaio de tração. Os parâmetros empregados na fabricação do tubo também foram os mesmos da Tab.3, entretanto, com base na análise realizada, foi utilizada a menor vazão de gás de proteção que foi capaz de evitar o surgimento de poros internos nos espécimes fabricados. A escolha dessa vazão se deu como maneira de otimizar e reduzir o gasto de matéria prima associada ao processo como também evitar a fabricação do tubo com a presença de poros internos que poderiam vir a prejudicar os ensaios mecânicos.

O tubo foi fabricado com as mesmas dimensões dos espécimes (23,4 mm de diâmetro interno e 40 mm de diâmetro externo) com um comprimento total de 300 mm. Posteriormente a fabricação, foi realizada a usinagem interna e externa para prosseguir com o ensaio de tração. A Fig.12 mostra as dimensões do tubo.

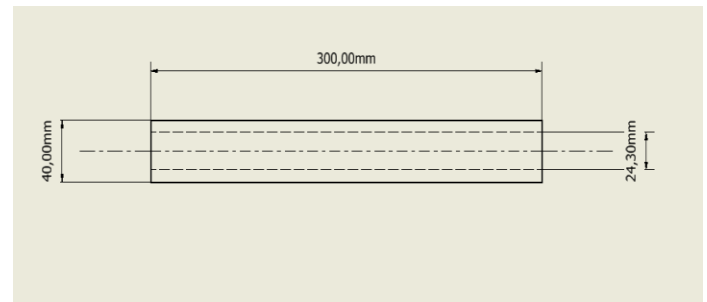


Fig. 12: Dimensões do tubo fabricado.

5) Ensaios mecânicos.

Com a finalização das etapas de fabricação, realizou-se ensaios mecânicos a fim de determinar algumas propriedades dos componentes fabricados. Foram realizados um ensaio de tração para determinar o limite de resistência e também o limite de escoamento do tubo além de um ensaio de dureza no flange.

O ensaio de tração foi realizado utilizando uma máquina universal de ensaios Shimadzu UHF-600KNX. O ensaio foi conduzido com uma velocidade de 2 mm/min a fim de evitar qualquer escorregamento da garra da máquina.

Para o ensaio de tração, foi levado em consideração as normas ABNT NBR 5590-2015 [28] e também a norma ASTM A370 [29]. A primeira norma estabelece os requisitos mínimos de operação para tubos de aço carbono como o limite de resistência a tração mínimo e o limite de escoamento mínimo permitido para materiais de Grau B, evidenciados na Tab.4.

Tab.4: Requisitos mínimos para operação de tubos de aço. Adaptado [28].

Grau de aço	Limite de resistência LR mín. MPa (Psi)	Limite de escoamento LE mín. MPa (Psi)
B	415 (60.000)	240 (35.000)

Já a segunda norma é referente aos procedimentos padrões para ensaio de produtos feitos em aço. A norma estabelece que na realização de ensaio em tubos com tamanho completo, devem ser confeccionados plugues a serem inseridos em cada uma das extremidades do tubo. Os plugues devem estar

distantes entre si por um comprimento denominado de *Gauge Length* com 50 mm de comprimento. A Fig.13 exemplifica o esquema de encaixe dos plugues de acordo com a norma e Fig.14 representa as dimensões dos plugues confeccionados.

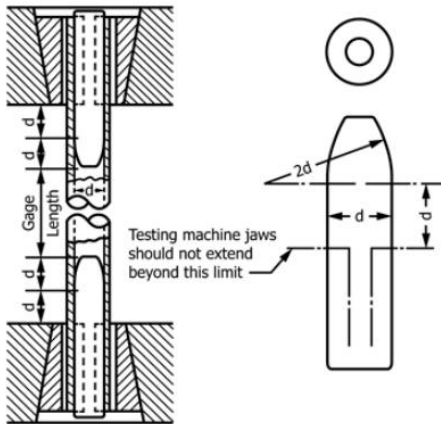


Fig. 13: Esquema de ensaio com plugues [29].

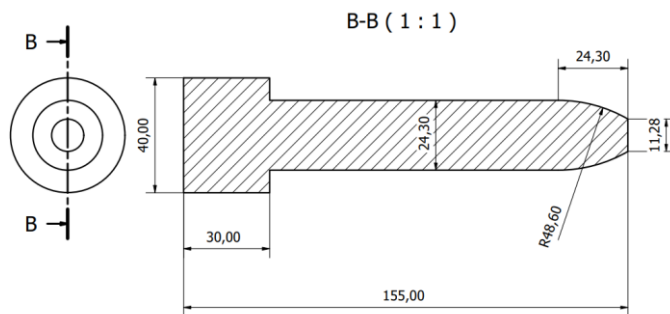


Fig. 14: Dimensões dos plugues fabricados.

Para a realização do ensaio de dureza, foi retirada uma amostra de 10 mm de espessura do flange selecionado. O ensaio foi conduzido com a utilização de um durômetro HV100 da fabricante Mitutoyo (Fig.15) e foi aferida a Dureza Vickers do material. O procedimento consistiu na aplicação de uma carga de 5kgf e com a divisão da peça em 5 faixas longitudinais onde foram realizadas 6 indentações espaçadas em 5 mm entre si, totalizando 30 pontos de medição (Fig.16).



Fig. 15: Durômetro Mitutoyo HV100.



Fig. 16: Representação do ensaio de dureza

Após a realização da aferição, foi calculada a média aritmética e o desvio padrão para cada grupo de medições a partir das equações Eq.1 e Eq.2.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

Onde:

\bar{x} = Média aritmética

n = Total de medições

i = Número da medição

x_i = Medição individual

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

Onde:

s = Desvio padrão amostral

x_i = Medição individual

\bar{x} = Média aritmética

n = Total de medições

Posteriormente, foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos em ambos os ensaios pelo tubo CMT e os valores reportados por Silva [9] a fim de determinar qual componente obteve melhores propriedades de resistência mecânica.

6) Ensaio de corrosão.

Para a realização do ensaio de corrosão, foram retiradas três seções do flange que foi selecionado após a fabricação

preliminar. Em cada secção, foi extraída uma amostra com as dimensões de 30mm x 20mm x 8mm (Comprimento x largura x espessura).

Foram utilizadas 3 soluções diferentes para a realização do ensaio sendo cada uma destinada a uma amostra diferente. As soluções são:

1. Solução aquosa com diluição de 400 g de Cloro e 1 L de água destilada ($\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O}$)
2. Solução aquosa de Tricloro-S-Triazina-Triona com 90% de cloro ativo (TriCl 90%)
3. Solução aquosa de Hipoclorito de Sódio com concentração ativa de 12% (Hipo 12%)

Anteriormente, foi realizada a medição da massa de cada amostra utilizando uma balança analítica GEKAHA AG 200 com resolução de 0,0001 g. Após a pesagem, as amostras foram inseridas em Beckers, cada um com uma solução diferente. O ensaio foi realizado durante um período de 7 dias em um ambiente com temperatura controlada de 23 °C e posteriormente foi realizada novamente a medição das massas das amostras a fim de determinar a perda de material e também a taxa de corrosão anual (mm/ano) com base na Eq.3

$$T_c = \frac{\Delta M}{S \cdot t \cdot \rho} \quad (3)$$

Onde:

- T_c = Taxa de corrosão da amostra (mm/ano)
- ΔM = Variação de massa antes e após o ensaio (g)
- S = Área superficial exposta da amostra (mm^2)
- t = Tempo de realização do ensaio (anos)
- ρ = Densidade do material (g/mm^3)

7) Análise Microestrutural e de Corrosão.

Após os ensaios, foi realizada a análise microestrutural do material e também do tipo de corrosão que ocorreu em cada amostra.

Para a análise microestrutural, foi retirada uma amostra de 10 mm de espessura do flange selecionado. A amostra foi previamente lixada com lixas de granulometria de 100, 220, 400, 600 e por fim 1200, nessa ordem respectivamente. Após essa etapa, foi realizado o polimento utilizando Alumina e posteriormente o ataque químico utilizando Vilela por um período de 7,5s. Após o fim da preparação da amostra, foi utilizado um microscópio ótico ZEISS Axio Imager M2 para a visualização de detalhes da microestrutura. Foram extraídas imagens ao longo da peça no sentido vertical utilizando uma ampliação de 100x e 200x.

Na análise da corrosão das amostras, foi feita uma visualização preliminar em um microscópio ZEISS Stereo Discovery V.8 utilizando-se uma ampliação de 2,5x para visualizar as amostras. A caracterização da forma de corrosão foi realizada utilizando-se o microscópio ZEISS Axio Imager M2 com ampliação em 50x. Diferentemente da análise microestrutural, não foi preciso realizar o preparo das amostras, apenas a limpeza utilizando uma lavadora ultrassônica.

Os equipamentos utilizados nas etapas de análise podem ser visualizados nas Fig.17 e Fig.18.



Fig. 17: Microscópio ZEISS Axio Imager M2.

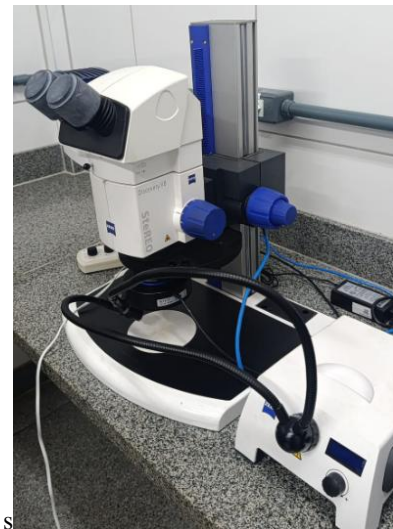


Fig. 18: Microscópio ZEISS Stereo Discovery V.8.

IV. RESULTADOS

A. Fabricação preliminar.

Realizou-se a fabricação de ambos os flanges com os espaçamentos de 9 mm e 12 mm. A deposição ocorreu sobre o mesmo substrato. A Fig.19 mostra o resultado da fabricação preliminar dos flanges.



Fig. 19: Flanges fabricadas.

Observando o flange fabricado utilizando o espaçamento de 12 mm, é possível notar que o componente possui um acabamento superficial homogêneo sem a presença notável de defeitos superficiais. Além disso, a geometria do espécime se mostrou íntegra, sem a presença considerável de deformações, apenas nas regiões de transição dos cordões para um cordão mais externo, o que é totalmente aceitável, tendo em vista que durante o movimento do manipulador na troca de anéis ainda ocorre a deposição de material. Mesmo com esse fator, não ocorreu deformação considerável do componente fabricado.

Já em relação ao flange fabricado utilizando o espaçamento de 9 mm, também não ocorreu a presença de defeitos superficiais, entretanto, a geometria do componente não apresentou a mesma integridade que a flange com 12 mm de espaçamento. A peça apresentou uma inclinação partindo do centro até a parte mais externa.

A explicação para esse detalhe se deve a quantidade de cordões depositados. Observando a Fig.8 e Fig.9, é possível observar que para um espaçamento de 12 mm, ocorreu a deposição de 9 anéis enquanto para o espaçamento de 9 mm, 11 anéis foram depositados. Devido à presença de um maior número de anéis depositados e da fixação da medida do diâmetro interno e também externo por projeto, a deposição foi compensada no sentido da altura da peça. Além disso, pela proximidade entre os dois anéis mais externos, durante a deposição do material, ocorreu a sobreposição dos cordões, causando assim o desnível responsável por afetar a integridade geométrica do flange. Ding [30] em seu trabalho sobre a sobreposição de cordões em MADA, relata que a diminuição da distância do centro de deposição de cordões pode levar a diminuição da suavidade da superfície depositada e também o aumento da espessura do cordão adjacente.

Realizou-se a medição da altura do flange em 5 pontos diferentes, igualmente espaçados a fim de visualizar melhor a planicidade da superfície. A primeira medida foi realizada próximo ao centro enquanto a quinta foi realizada na parte mais externa. O gráfico pode ser observado na Fig.20.

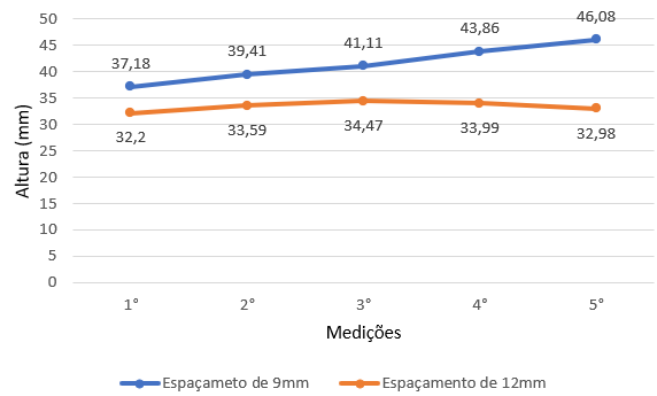


Fig. 20: Perfil de altura dos flanges.

A partir do gráfico é possível observar que o desnível, entre a menor altura medida e a maior altura, para o espaçamento de 12 mm foi de 2,27 mm, enquanto para o espaçamento de 9 mm foi de 8,90 mm. Com base nesses valores, é possível concluir que o flange fabricado com espaçamento de 12 mm possui uma planicidade maior que o com espaçamento de 9 mm, indo de encontro com o que foi observado na análise qualitativa.

Por apresentar melhor resultado, o flange fabricado utilizando espaçamento de 12 mm entre os cordões foi selecionado como o definitivo para a fabricação do tubo.

B. Análise da vazão do gás de proteção.

Os espécimes fabricados apresentaram divergência entre si, em relação ao acabamento externo e também na presença de diferentes defeitos superficiais.

A utilização de uma vazão de 10 L/min se mostrou a mais precária na etapa realizada. Analisando a Fig.21, é possível identificar que o espécime fabricado não apresentou acabamento homogêneo ao longo da sua extensão, com a presença de defeitos superficiais expressivos como o colapso da poça de fusão na região esquerda da figura.

A explicação para esse tipo de defeito está relacionada ao baixo poder de resfriamento durante o processo. O gás possui uma capacidade de troca térmica por meio de convecção atrelado ao seu escoamento sobre o componente e devido à baixa vazão, o resfriamento do espécime se mostrou precário, levando ao acúmulo de calor na região superior da peça, ocasionando a refusão de parte da camada inferior, levando ao deslizamento do material depositado.

Hauser [31] em seu trabalho investigativo sobre a formação de poros internos em componentes fabricados por alumínio, realiza a simulação do escoamento de gás de proteção para vazões de 6 L/min, 8 L/min e 10 L/min através de Dinâmica dos Fluidos Computacional. O autor conclui que quanto menor a vazão do gás de proteção, menor o poder de resfriamento sobre os componentes fabricados durante o processo.



Fig. 21: Espécime fabricado com 10 L/min.

Além disso, outro defeito presente no espécime fabricado utilizando a vazão de 10 L/min foi a formação de bolhas de material, situadas na região direita da Fig.21, que assim como o colapso da poça de fusão, comprometeram a geometria do componente. Durante a etapa de retirada dos corpos de prova para a análise de porosidade interna, foi possível identificar que essas bolhas ocorreram devido a formação de poros internos (Fig.22).

A baixa vazão de gás de proteção não é capaz de gerar uma atmosfera de proteção durante o processo, levando a inclusão de ar dentro do volume do componente. Sahul [32] em seu trabalho investiga a influência da vazão de gás de Argônio na formação de poros em componentes fabricados em Alumínio. O autor relata que em baixas vazões, um comportamento de turbulência no escoamento do gás, causando a desestabilização do processo. Com o arco instável, a entrada de gases atmosféricos na região de deposição se torna mais fácil, possibilitando a formação de defeitos internos.



Fig. 22: Vista na região de corte do espécime de 10 L/min.

Diferentemente do espécime com 10 L/min, os componentes feitos utilizando uma vazão de 15 L/min, 20 L/min e 30 L/min (Fig.23, Fig.24 e Fig.25 respectivamente) apresentaram acabamento superficial homogêneo em toda a sua estrutura e além disso não ocorreu o surgimento de defeitos superficiais durante a sua fabricação.



Fig. 23: Espécime fabricado com 15 L/min.

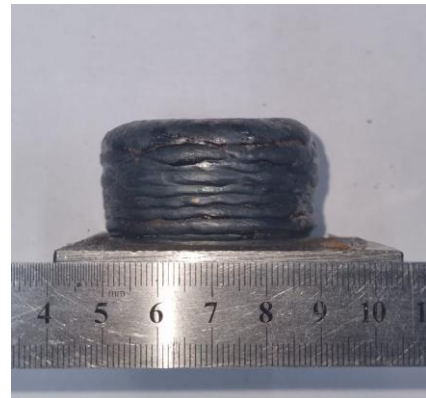


Fig. 24: Espécime fabricado com 20 L/min.



Fig. 25: Espécime fabricado com 30 L/min.

O espécime fabricado utilizando a vazão de 25 L/min (Fig.26) apresentou resultado atípico e fora do esperado em comparação aos demais. Por estar situado entre 20 L/min e 30 L/min, vazões estas que não apresentaram defeitos superficiais, esperava-se que o espécime também demonstrasse acabamento homogêneo e integridade geométrica, o que não foi o caso. Na camada superficial, ocorreu o deslizamento de parte do material depositado.

Ademais, também foi possível notar a presença de dois defeitos superficiais no componente, sendo o primeiro a presença de uma região com a fissura de parte do cordão (Fig.27) e também a presença de uma pequena bolha, que assim

como o espécime de 10 L/min, ocorreu a formação de poros dentro da peça (Fig.28).



Fig. 26: Espécime fabricado com 25 L/min.



Fig. 27: Vista superior do espécime de 25 L/min.



Fig. 28: Vista na região de corte do espécime de 25 L/min.

Após a etapa de análise qualitativa, foi realizada a retirada dos corpos de prova com 10 mm de espessura de cada espécime. Na Fig.29 é possível visualizar cada corpo de prova com a sua respectiva identificação com base na vazão de gás.

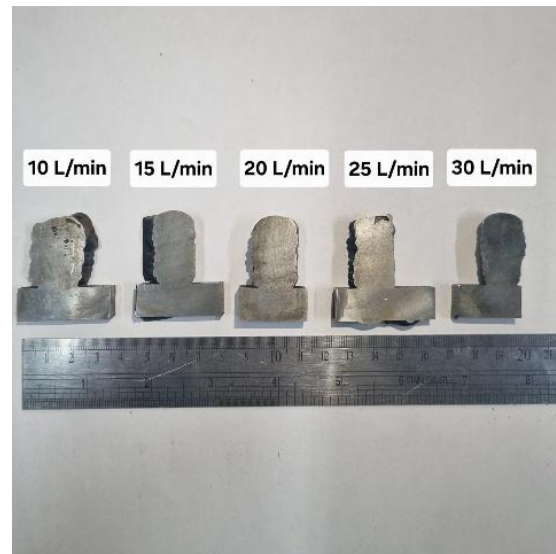


Fig. 29: Corpos de prova extraídos dos espécimes.

Posteriormente a realização da tomografia, foi possível gerar imagens computadorizadas do resultado em cada amostra analisada. Essas imagens podem ser visualizadas entre as Fig.30 e a Fig.34.

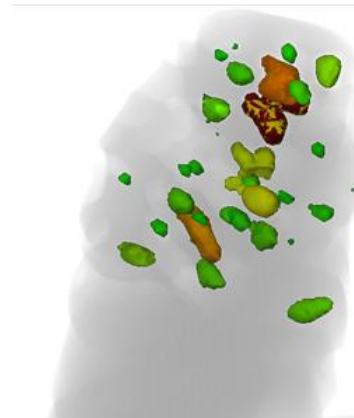


Fig. 30: Visualização no tomógrafo - espécime de 10 L/min.



Fig. 31: Visualização no tomógrafo - espécime de 15 L/min.



Fig. 32: Visualização no tomógrafo - espécime de 20 L/min.



Fig. 33: Visualização no tomógrafo - espécime de 30 L/min.

Dentre os corpos de prova analisados, o retirado do espécime fabricado utilizando uma vazão de 10 L/min foi o que apresentou o volume mais significativo de poros internos. Observando a Fig.30 é possível visualizar que a porosidade da amostra se encontra distribuída ao longo da sua extensão, sem a presença de pontos concentração específicos.

A amostra de 15 L/min também apresentou a presença de poros, porém é possível notar a partir da Fig.31 que o defeito se localiza apenas na região mais ao topo do corpo de prova enquanto o restante da sua estrutura indica a ausência de defeitos internos.

Analisando a Fig.32, é possível identificar que a vazão de 20 L/min apresentou a fabricação do espécime com ausência de poros internos, mantendo uma formação com integridade da peça. Esse fato também pode ser observado na amostra de 30 L/min presente na Fig.33.

Ademais, assim como ocorreu na etapa de análise qualitativa dos espécimes fabricados, o corpo de prova com 25 L/min apresentou um resultado não esperado para a formação de poros internos. Com base na vazão de 20 L/min, que apresentou ausência de formação de poros internos, esperava-se o mesmo comportamento para a amostra de 25 L/min, o que não aconteceu como pode ser visualizado na Fig.34. Observando a figura, é possível notar a presença de poros distribuídos ao longo da amostra. O poro localizado mais ao topo (indicado pela coloração avermelhada na figura) é o mesmo reportado anteriormente, que surgiu devido a inclusão de ar atmosférico durante o processo de fabricação.

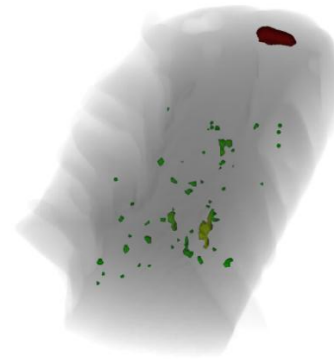


Fig. 34: Visualização no tomógrafo - espécime de 25 L/min.

A provável causa para a formação dos defeitos interno pode estar relacionado a um erro experimental devido ao mal funcionamento do equipamento responsável pela vazão de gás. Mesmo com essa hipótese, não foram realizadas investigações profundas pois foi possível identificar vazões capazes de fabricar componentes com a ausência de poros.

A partir dos resultados indicados pelo tomógrafo, foi possível levantar um gráfico do volume total de poros internos em mm^3 pela vazão de gás empregada. O gráfico pode ser visualizado na Fig.35.

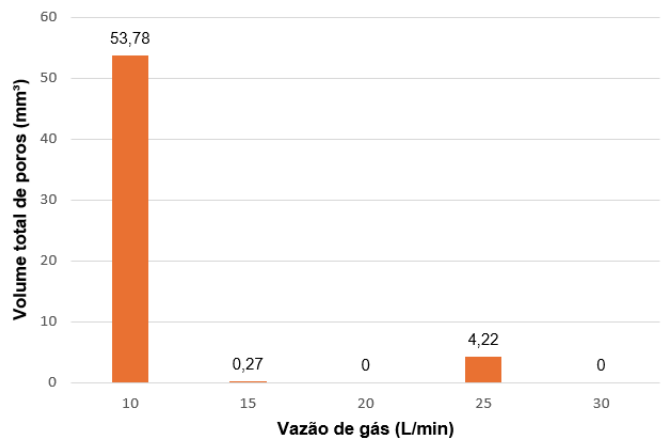


Fig. 35: Gráfico do volume total de poros pela vazão de gás.

A amostra do espécime fabricado utilizando a vazão de 10 L/min apresentou o maior valor de volume total de poros internos, com $53,78 \text{ mm}^3$ em volume.

Assim sendo, é possível concluir que 20 L/min é o menor valor, dentre os analisados para a vazão de gás de proteção, que foi capaz de criar uma atmosfera de proteção com capacidade de fabricação do espécime com a ausência de poros interno. Baseado nesse resultado, optou-se por utilizar esse valor para a fabricação da parte superior do tubo flangeado.

C. Análise Microestrutural.

A análise Microestrutural foi conduzida em uma amostra extraída do Flange. Durante a visualização em microscópio, foram observadas três regiões diferentes na amostra, sendo a

primeira próxima a parte inferior, a segunda localizada no centro da amostra e a terceira próxima as últimas camadas depositadas. A Fig.36 mostra uma representação das regiões visualizadas.

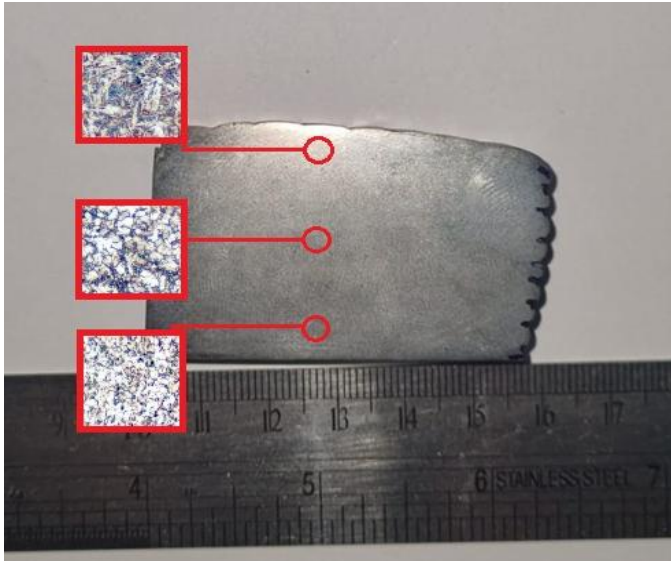


Fig. 36: Corpo de prova utilizado na análise microestrutural.

A Fig.37 e Fig.38 mostram a visualização da microestrutura da primeira região (parte inferior), com ampliação de 100x e 200x respectivamente.

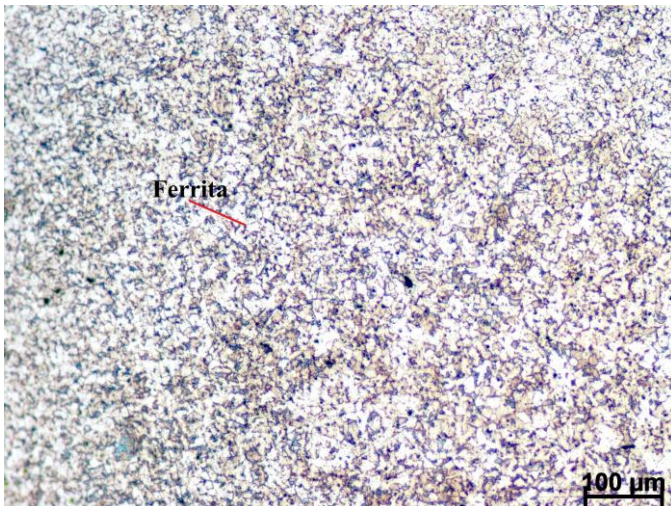


Fig. 37: Microestrutura da parte inferior - ampliação de 100x

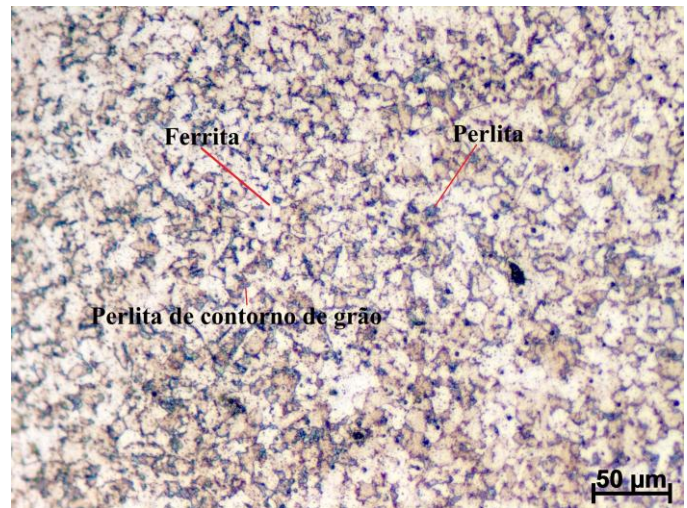


Fig. 38: Microestrutura da parte inferior - ampliação de 200x.

A partir da visualização em microscópio com ampliação de 100x, foi possível identificar a presença de uma microestrutura composta majoritariamente por ferrita, na região inferior do flange. Com a ampliação de 200x, foi possível uma melhor visualização dos grãos de ferrita com formação equiaxial e a presença de carbonetos em seu interior. Ademais, foi possível observar a formação de pequenos grãos de perlita espalhados pela microestrutura do material. Outra formação presente, foi a de perlita no contorno de grão, inseridas entre os grãos de ferrita.

Shukla [33] reporta a formação microestrutural semelhante em seu trabalho. O autor realizou a fabricação de componentes utilizando arame ER70S-6 com a deposição de 20 camadas por meio do processo CMT. Na região inferior dos componentes, foi relatada a formação de uma matriz ferrítica, com a formação de faixas estreitas de perlita.

Oliveira [34] também reporta a formação de ferrita e perlita na região inferior de uma parede depositada por meio do CMT, com 10 camadas de material e utilizando o arame ER70S-6.

A Fig.39 e Fig.40 mostram a visualização da microestrutura da segunda região (central), com ampliação de 100x e 200x respectivamente.

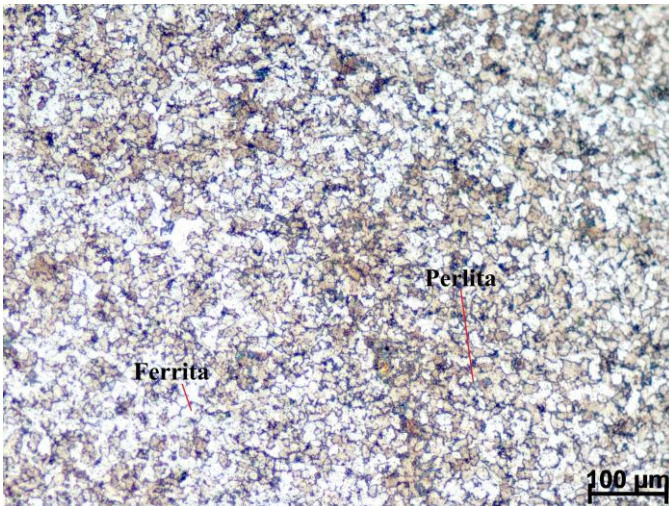


Fig. 39: Microestrutura da parte central - ampliação de 100x.

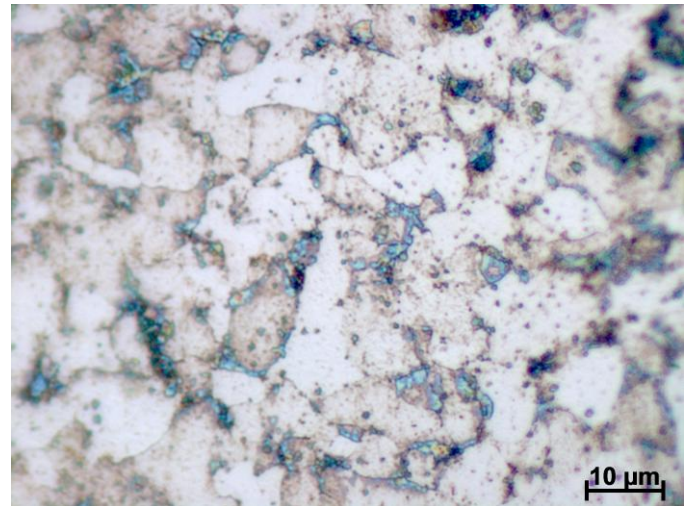


Fig. 41: Microestrutura da parte inferior - ampliação de 1000x.

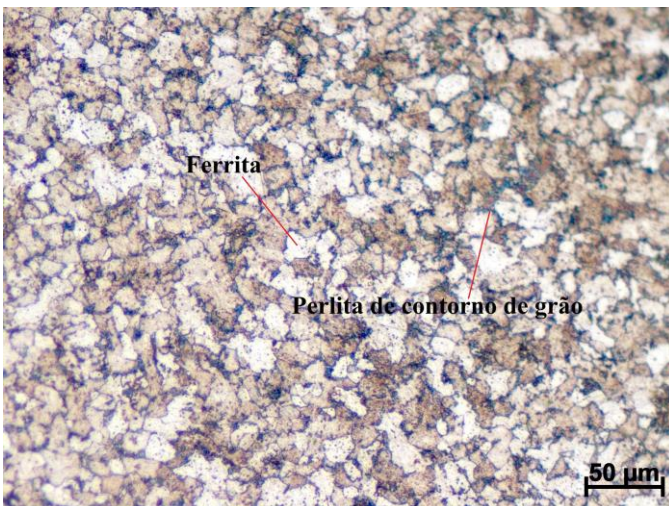


Fig. 40: Microestrutura da parte central - ampliação de 200x.

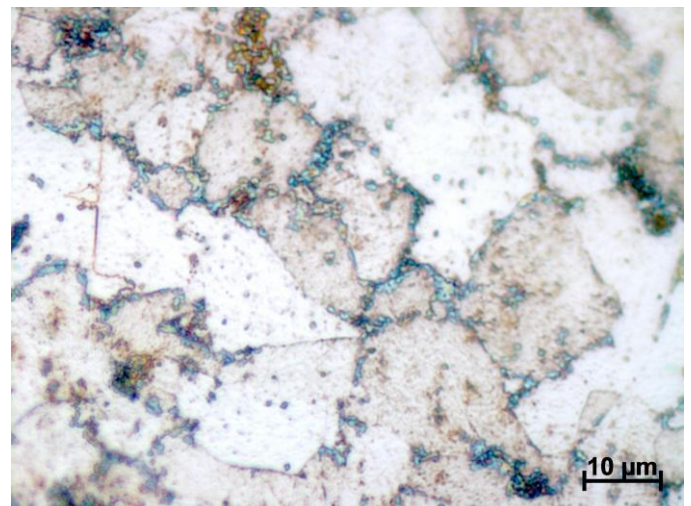


Fig. 42: Microestrutura da parte central - ampliação de 1000x.

Na Fig.39, é possível observar formação microestrutural na região central do flange, semelhante a presente na base. Nessa região, ocorreu a formação de ferrita juntamente com a formação de grãos de perlita. A heterogeneidade microestrutural fica evidente ao visualizar a imagem com ampliação de 200x (Fig.40), onde foi possível observar a presença de perlita no contorno dos grãos.

Em relação a parte inferior da amostra (Fig.38), na Fig.40 também é possível observar, de uma maneira qualitativa, que os grãos de ferrita possuem tamanho superior e uma menor presença de perlita. A presença de menores grãos na região inferior do corpo de prova é devido a presença do substrato que auxilia na retirada de calor dessa região, o que por consequência, impede o crescimento de grão. Uma imagem com ampliação de 1000x foi realizada na parte inferior (Fig.41) e no centro do flange (Fig.42) para facilitar a observação dos grãos.

Por fim, a Fig.43 e Fig.44 mostram a visualização da microestrutura da terceira região (parte superior), com ampliação de 100x e 200x respectivamente.

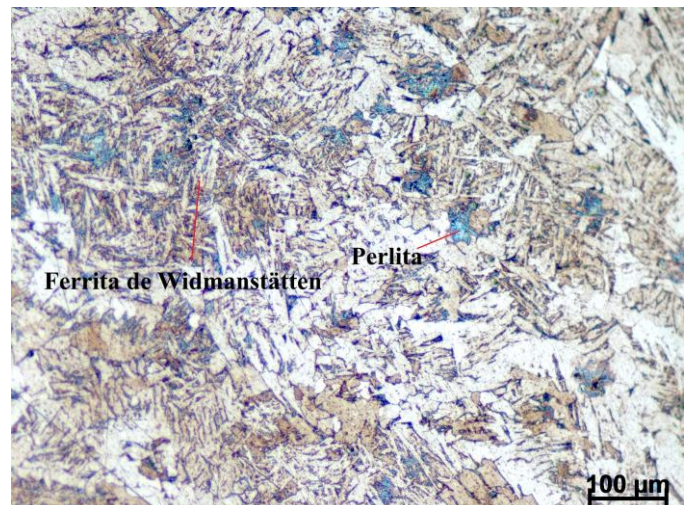


Fig. 43: Microestrutura da parte superior - ampliação de 100x.



Fig. 44: Microestrutura da parte superior - ampliação de 200x.

Na Fig.43 é possível observar a presença de ferrita de widmanstätten na microestrutura da região superior do flange. Essa formação microestrutural é caracterizada pelo formato agulhar dos grãos de ferrita. Além disso, também foi possível observar a formação de maiores grãos de perlita, comparada as demais regiões do flange. Na Fig.44, ao aumentar a ampliação de 100x para 200x, foi possível observar melhor a região, permitindo identificar a presença perlita formada no contorno de grãos, alguns grãos de ferrita equiaxial e por fim, ferrita de widmanstätten.

A formação microestrutural da ferrita de widmanstätten nas últimas camadas ocorreram devido ao resfriamento gradual nessa região que foi mantida em contato com o ar em temperatura ambiente sem a refusão pela deposição de novas camadas. Karamimoghadam [35] também encontrou a mesma microestrutura, presente em nas regiões superiores de cordões depositados de ER70S-6 a partir do processo CMT. Shukla [33] por outro lado, relata a formação de bainita acicular levantando a mesma hipótese acerca do rápido resfriamento da região superior do componente fabricado por CMT.

D. Ensaios Mecânicos.

1) Ensaio de Tração.

Posteriormente a etapa de análise da vazão de gás de proteção, seguiu-se com a fabricação do tubo utilizando uma vazão de 20 L/min para a vazão de gás de proteção. Juntamente a fabricação do tubo, foram confeccionados os plugues a serem utilizados no ensaio de proteção. O tubo fabricado, já usinado tanto internamente quanto externamente, juntamente com os plugues já inseridos em seu interior podem ser visualizados na Fig.45.



Fig. 45: Tubo e plugues fabricados.

O ensaio de tração foi conduzido de acordo com os procedimentos previamente descritos no item B.3 da seção III deste trabalho. O gráfico de força por deslocamento e os valores resultantes do ensaio do tubo para o limite de escoamento, limite de resistência à tração e também para o podem ser visualizados na Fig.46 e na Tab.5 respectivamente.

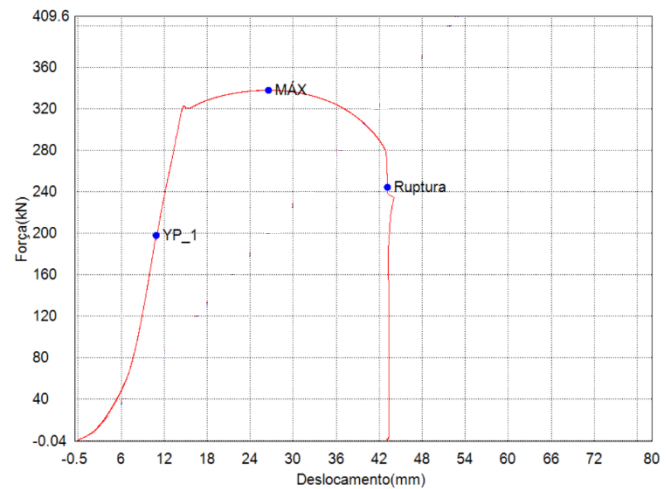


Fig. 46: Gráfico de força por deslocamento do ensaio.

Tab.5: Resultados do ensaio de tração.

limite de escoamento (MPa)	385,69
limite de resistência à tração (MPa)	426,15
Deslocamento (mm)	43,12

Os resultados do ensaio indicaram um valor de 385,69 MPa para o Limite de Escoamento e 426,15 MPa para o Limite de resistência a tração. Em relação ao deslocamento, o tubo obteve 43,12 mm até a sua ruptura.

Comparando os valores obtidos no ensaio com os valores mínimos evidenciados na norma NBR 5590 [28] presentes na Tab.4, é possível concluir que o tubo obteve resultados dentro dos requisitos para operação, com 2,68% e 60,70% acima do valor mínimo estabelecidos para o limite de resistência e limite de escoamento respectivamente para materiais de Grau B.

Após o ensaio do tubo, foi realizada a visualização da região de ruptura, afim de entender o mecanismo de falha. A Fig.47 mostra uma imagem dessa região, enquanto a Fig.48 e Fig.49

mostra uma ampliação de 2,5x de algumas partes.

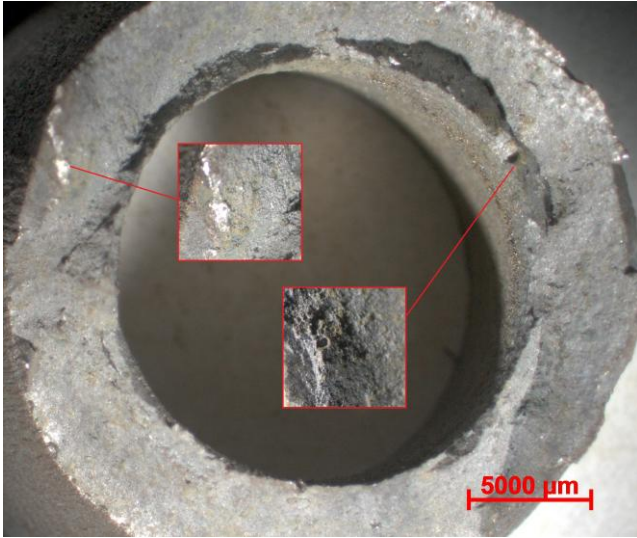


Fig. 47: Vista superior da região de ruptura do tubo.



Fig. 48: Primeira vista superior da região de ruptura do tubo - ampliação de 2,5x.

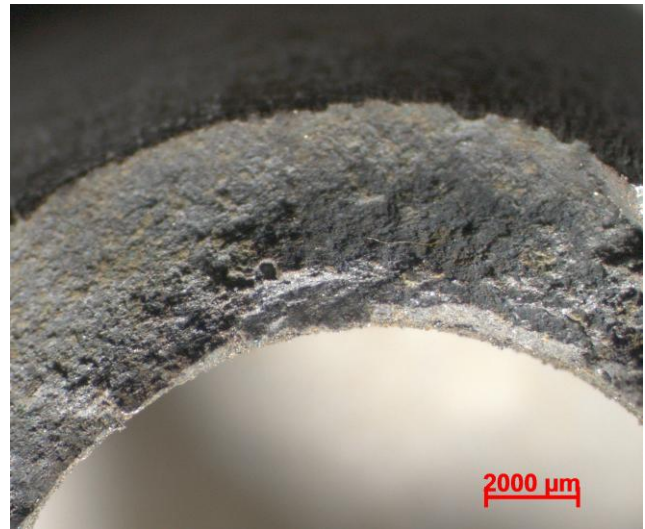


Fig. 49: Segunda vista superior da região de ruptura do tubo - ampliação de 2,5x.



Fig. 50: Tubo após o ensaio.

Nas Fig.48 e Fig.49 é possível visualizar a região fibrosa onde ocorreu a formação de microcavidades. Observando o tubo após ensaio (Fig.50), é possível notar que a falha sofrida apresentou comportamento dúctil, fato esse evidenciado pelo afinamento da seção do tubo sofrido durante o processo. Essa região denominada de “empescoamento” é localizada próxima a zona de ruptura do tubo. Além disso, é possível visualizar a formação da fratura por cisalhamento em 45° , o que também caracteriza uma ruptura dúctil, como afirma Souza [36].

O comportamento de ruptura dúctil em componentes fabricados pelo processo CMT é comum com relatos evidenciados na literatura. Dirisu [37] realiza um estudo investigativo sobre tenacidade a fratura em componentes de aço fabricados por CMT utilizando uma estratégia de deposição oscilatória. O arame ER70S-6 é um dos utilizados no experimento e ao final do trabalho, o autor conclui que o principal mecanismo de falha nos corpos de prova extraídos foi o de ruptura dúctil.

Os valores obtidos no ensaio de tração foram comparados com os reportados por Silva [9] em seu trabalho comparativo sobre a fabricação de um tubo flangeado utilizando o processo MADA-GMAW e um tubo fabricado por processos convencionais. Um gráfico foi levantado para melhor visualização dos valores e pode ser observado na Fig.51.

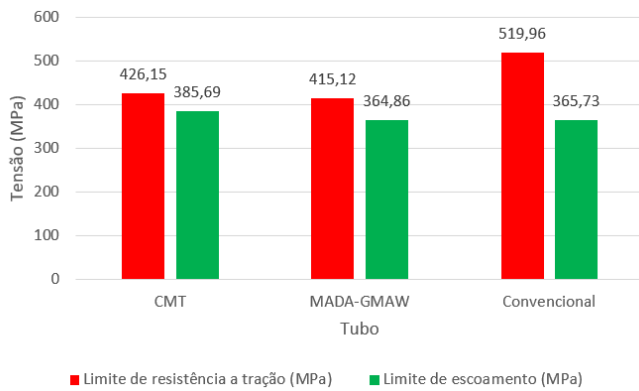


Fig. 51: Gráfico comparativo do limite de resistência a tração e limite de escoamento do tubo CMT com valores reportados por Silva [9].

Ao analisar o gráfico, é possível identificar que os valores obtidos para o tubo fabricado por CMT para o limite de escoamento, apresentaram um valor superior ao MADA-GMAW e o tubo convencional em cerca de 5,71% e 5,45% respectivamente. Esse comportamento sugere que o componente CMT apresenta ductibilidade superior a ambos.

Ademais, também é notável que o tubo CMT apresentou um valor para o limite de resistência a tração superior que o MADA-GMAW em cerca 2,66%, porém comparado ao tubo convencional, apresentou um valor inferior em 22,01%.

Comparações na literatura também reportam valores superiores para processo CMT nas propriedades obtidas em ensaios mecânicos realizados em componentes fabricados por CMT e GMAW. Nagasai [38] em seu trabalho, compara as propriedades mecânicas obtidas em ensaio de tração realizado em corpos de prova extraídos de componentes cilíndricos fabricados tanto por CMT quando por MADA-GMAW. Para a realização dos testes, o autor divide os dois componentes em parte superior e inferior. Os resultados obtidos indicam limite de resistência a tração e limite de escoamento maior para o CMT em relação ao MADA-GMAW em 21,75% e 30,57% respectivamente na região superior e 14,68% e 20,42% para a região inferior.

2) Ensaio de dureza.

O ensaio de dureza foi realizado no corpo de prova extraído do flange selecionado como mostra a representação da Fig.16. Com base nos resultados obtidos, foi realizado o cálculo da média aritmética e também do desvio padrão utilizando a Eq.1 e Eq.2 respectivamente. A partir dos resultados, foi realizado o levantamento de um gráfico com os valores obtidos para cada série de medições, que pode ser visualizado na Fig.52.

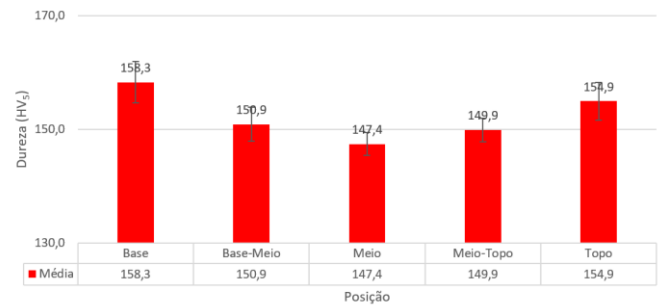


Fig. 52: Gráfico de valores obtidos no ensaio de dureza.

Os resultados do ensaio indicaram uma dureza média de 158,3 HV₅ na região próxima a parte inferior do corpo de prova (Base) e ao aproximar-se da região localizada ao meio do flange, a dureza mostrou tendência de redução do valor, com dureza média de 150,9 HV₅ na zona de transição da região inferior para o meio (Base-Meio) e por fim 147,4 HV₅ na porção do meio (Meio).

Após a região do meio do corpo de prova, a dureza média mostrou tendência de crescimento, com um valor de 149,9 HV₅ na zona de transição da região do meio para o topo da amostra (Meio-Topo) e por fim 154,9 HV₅ na região superior (Topo). Considerando os valores obtidos, o corpo de prova apresentou uma dureza média total de 152,3 HV₅.

Observando o gráfico do ensaio (Fig.52), é possível visualizar um ponto de inflexão, com a diminuição da dureza até o centro do corpo de prova e depois o aumento novamente até a parte superior. A explicação para esse comportamento está relacionada microestrutura do material além de possíveis tratamentos térmicos sofridos nas camadas inferiores durante a deposição das camadas superiores. Conforme discorrido anteriormente no item C da seção IV desse trabalho, a base do flange apresentou, de maneira qualitativa, a formação de grãos de ferrita com menor dimensão comparado a região central do flange, além de uma maior quantidade de formação de perlita, sendo ambos os fatores responsáveis por resultar em uma maior dureza na primeira linha de medição. Já em relação ao topo, o aumento da dureza foi gerado pela presença da ferrita de widmanstätten.

Lopes [39] durante o ensaio de dureza em corpos de prova fabricados com arame ER70S-6 com temperatura de interpasse de 100 °C, 150 °C e sem parada, também observa um ponto de inflexão no gráfico de dureza ao comparar as regiões inferiores com as superiores. O autor relata maior dureza no componente fabricado com temperatura de interpasse de 100 °C e também a presença de grãos de ferrita com menores dimensões comparadas aos demais. Por fim, o autor conclui que o tamanho de grão refinado é responsável por maiores valores de dureza. Assim como na etapa do ensaio de tração, foi levantado um gráfico comparativo com os valores reportados por Silva [9], presente na Fig.53.

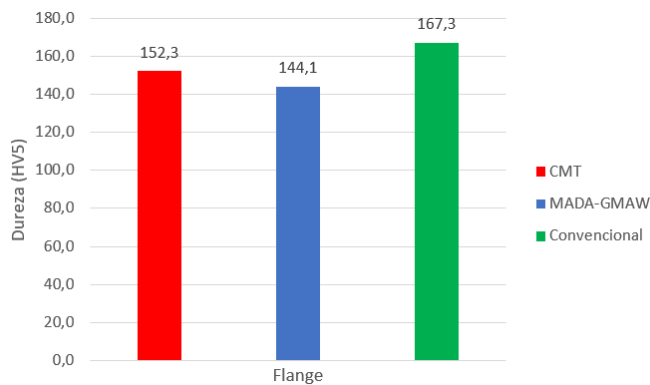


Fig. 53: Gráfico comparativo da dureza do flange CMT com valores reportados por Silva [9].

Observando o gráfico, é possível inferir que, o flange confeccionado pelo processo CMT apresentou uma dureza superior ao relatado para o MADA-GMAW em cerca de 5,7%. Ademais, o tubo convencional foi o que obteve maior dureza, com valor superior ao CMT em cerca de 9,8%.

Assim como nas propriedades obtidas no ensaio de tração, autores relatam dureza superior em componentes fabricado por CMT em relação ao MADA-GMAW. Nagasai [38] indica um resultado de 181 HV_{0,5} e 169 HV_{0,5} para a dureza na região superior e inferior, respectivamente, no componente cilíndrico fabricado por CMT, enquanto para o componente GMAW, o resultado foi de 166 HV_{0,5} e 156 HV_{0,5}.

E. Ensaio de corrosão.

Após os 7 dias de imersão em solução, foi realizada a medição de cada amostra a fim de determinar a perda de massa devido a corrosão. Além disso, foi realizado o cálculo da perda de massa por meio da Eq.3. A Tab.6 contém os resultados do ensaio.

Tab.6: Resultados do ensaio de corrosão.

TAG	Perda de massa (g)	Taxa de corrosão (mm/ano)
Cl ₂ + H ₂ O	4,8538	6,72
Hipo 12%	0,4564	0,63
TriCl 90%	5,5336	7,66

Com base nos resultados obtidos, a amostra que apresentou menor perda de massa e com menor taxa de corrosão foi a inserida na solução com tag de “Hipo 12%”, seguido pela amostra com tag “Cl₂+H₂O”. Por fim, a amostra que apresentou maior corrosão, foi a com tag “TriCl 90%”. A perda percentual de massa de cada amostra foi de 1,27%, 13,69% e 15,46% respectivamente.

Os resultados obtidos para a taxa de corrosão foram comparados com os reportados por Silva [9] para amostras extraídas do flange fabricado em MADA-GMAW e para o flange do tubo convencional. A Fig.54 mostra o gráfico comparativo para cada solução.

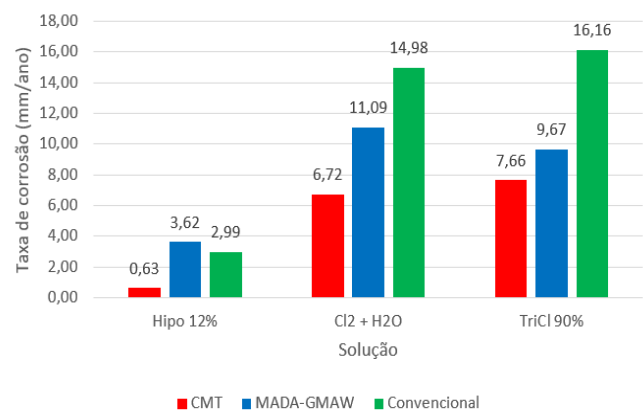


Fig. 54: Gráfico comparativo do ensaio de corrosão das amostras CMT com valores reportados por Silva [9].

Ao analisar o gráfico, é possível inferir que amostras CMT obtiveram resultados que indicam uma maior resistência a corrosão que as MADA-GMAW e que a do tubo convencional.

As amostras do MADA-GMAW apresentaram uma corrosão superior as CMT em cerca de 572,45%, 165,16% e 126,32% para as soluções de Hipo 12%, Cl₂+H₂O e TriCl 90% respectivamente. Já para as extraídas do tubo convencional, em comparação com as CMT, a corrosão foi superior em 474,60%, 222,91% e 210,96% para as mesmas soluções.

O menor valor para a taxa de corrosão foi o da amostra submersa na solução Hipo 12%, com uma corrosão estimada em 0,63 mm/ano, enquanto o maior valor foi o da amostra submersa na solução TriCl90%, com cerca de 7,66 mm/ano. Su [40] relata uma corrosão próxima de 0,46 mm/ano para amostras de aço carbono em soluções de NaClO a 40 °C. Mureşan [41] reporta um valor de 8,53 mm/ano para um aço baixo-carbono que foi inserido em uma solução de ácido clorídrico (HCl) por cerca de 24 semanas. Mesmo com a diferença entre as soluções empregadas e também a temperatura de ensaio, é notável que o valor obtido no ensaio é próximo aos citados na literatura para meios corrosivos baseados em cloro.

Após o ensaio, foi realizada a lavagem das amostras utilizando a lavadora ultrassônica. A Fig.55, Fig.56 e Fig.57 mostram as amostras das soluções Cl₂+H₂O, Hipo 12% e TriCl 90% respectivamente.

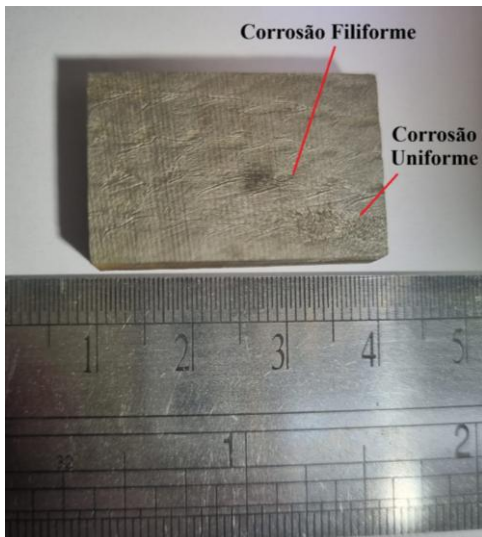


Fig. 55: Amostra $\text{Cl}_2+\text{H}_2\text{O}$.

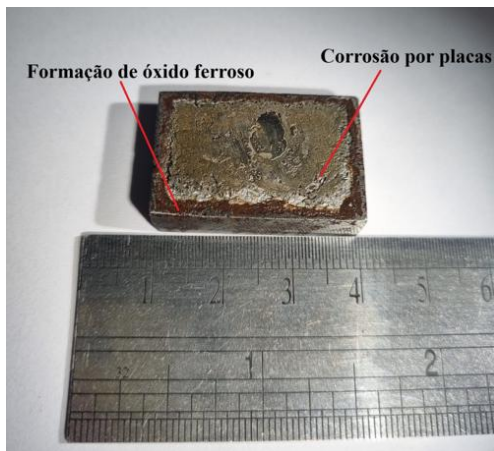


Fig. 56: Amostra Hipo 12%.



Fig. 57: Amostra TriCl 90%.

Observando a Fig.55, é possível identificar que a amostra submergida na solução $\text{Cl}_2+\text{H}_2\text{O}$, apresentou pontos com formação de corrosão filiforme, apresentando a formação de

filamentos finos. Além disso, foi possível observar a presença de uma região localizada na parte inferior da amostra com corrosão uniforme. Na Fig.56, referente a amostra da solução Hipo 12%, apresentou corrosão em placas na sua região central. Outro fator identificado foi a formação de óxido ferroso na região mais externa da amostra. Por fim, na Fig.57, referente a solução TriCl 90%, foi possível observar a presença de corrosão uniforme em toda a sua superfície, porém mais intensa que a amostra $\text{Cl}_2+\text{H}_2\text{O}$, fato esse evidenciado pela maior taxa de corrosão obtida no ensaio (Fig.54).

As amostras foram visualizadas em microscópio utilizando uma ampliação de 50x afim de observar com maior clareza cada mecanismo de corrosão. A Fig.58 mostra uma imagem extraída da amostra $\text{Cl}_2+\text{H}_2\text{O}$.



Fig. 58: Amostra $\text{Cl}_2+\text{H}_2\text{O}$ - Ampliação de 50x.

Durante a visualização (Fig.58), foi possível identificar que além da corrosão filiforme e também da corrosão uniforme, ocorreu pontos de corrosão por pitting, localizados próximos aos filamentos formados pela corrosão filiforme. Silva [42] relata a formação de corrosão uniforme e por pitting, durante o ensaio na solução de $\text{Cl}_2+\text{H}_2\text{O}$ da amostra do tubo convencional.

A formação de corrosão filiforme ocorre normalmente em componentes de alumínio, aço ou magnésio que possuem revestimentos como pinturas ou até revestimentos com função protetiva, conforme é indicado por Cristoforetti [43]. O processo MADA possui um princípio de funcionamento semelhante a aplicação de revestimentos, durante a deposição de material. O surgimento dos pontos de corrosão filiforme é justificável mesmo sem a aplicação de revestimento nas amostras.

A Fig.59 e Fig.60 mostram imagens extraídas da amostra Hipo 12%.

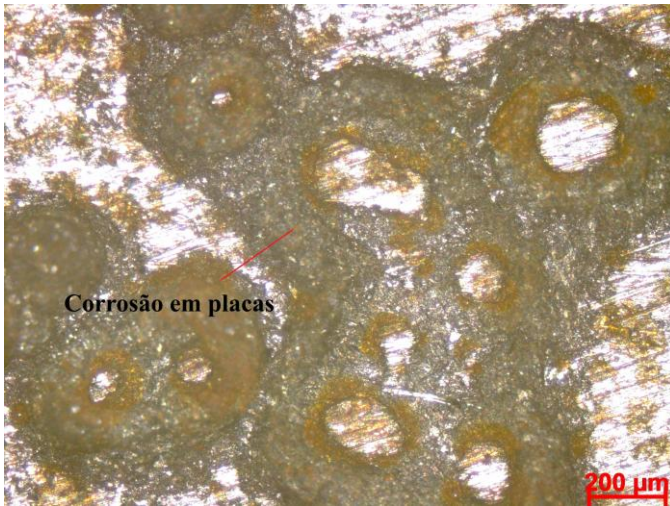


Fig. 59: Amostra Hipo 12%. - Ampliação de 50x.

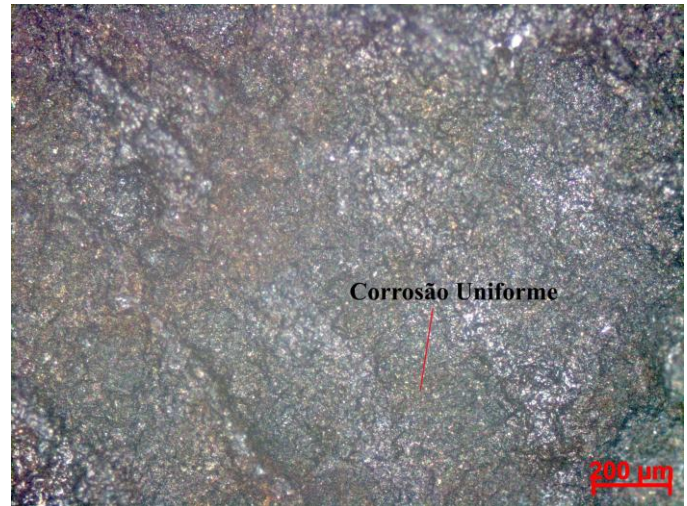


Fig. 61: Amostra TriCl 90%. - Ampliação de 50x.

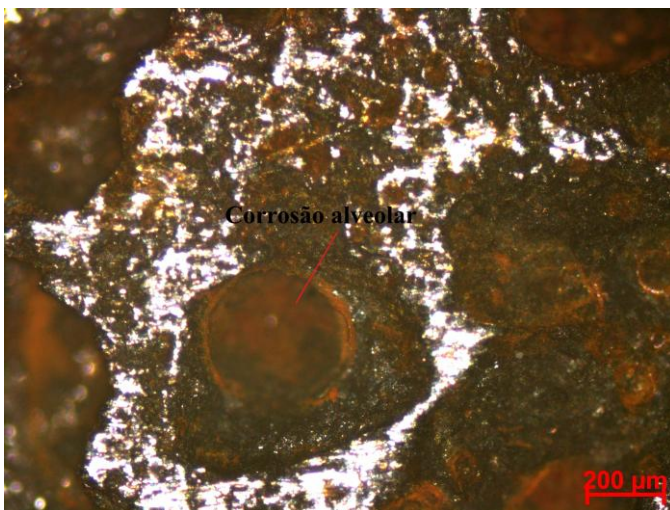


Fig. 60: Visualização da região com formação de óxido - Ampliação de 50x.

Na Fig.59, é possível visualizar a região no centro do corpo de prova, onde ocorreu a formação de corrosão em placas. Já na Fig.60, durante a visualização da região de formação de óxido, foi possível observar pontos de corrosão com a formação de alvéolos, caracterizados pelo grande diâmetro, em relação a sua profundidade.

Gao [44] e Albert [45] relatam a formação de corrosão localizada em amostras de aço empregadas em soluções com presença de íons Cl^- . Silva [42] também indica a presença de corrosão alveolar na amostra MADA-GMAW que foi submergida na solução Hipo 12%.

A Fig.61 mostra a imagem extraída da amostra TriCl 90%.

A ampliação em 50x da amostra TriCl 90% permitiu a visualização de um outro tipo de corrosão, também presente na amostra. Durante a inspeção em microscópio, foi possível identificar a presença de uma região com corrosão uniforme.

Silva [42] relata a presença de forma de corrosão semelhante na amostra MADA-GMAW empregada na solução de TriCl 90%.

V. CONCLUSÕES

A partir do trabalho realizado, foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

- Os flanges fabricados com espaçamento de 9 mm e 12 mm apresentaram ausência de defeitos superficiais, sendo que o de 12 mm apresentou melhor integridade geométrica.
- Os espécimes fabricados com vazão de gás de proteção inferior a 20 L/min apresentaram poros internos, mostrando-se a vazão de 20 L/min como a mínima indicada para a confecção. Mesmo sendo um valor acima de 20 L/min, a vazão de 25 L/min apresentou formação de poros.
- Em termos de microestrutura, a região inferior e central do flange apresentou a formação de ferrita e perlita. Já na região superior, foi encontrada a formação de ferrita de widmanstätten.
- O comportamento de falha no ensaio de tração do tubo fabricado foi de ruptura dúctil.
- O valor do limite de escoamento do tubo CMT foi superior ao tubo MADA-GMAW e o tubo convencional. Ademais, o limite de resistência a tração do CMT foi superior apenas comparado ao MADA-GMAW.
- A dureza do flange apresentou uma inflexão na região central devida à presença de grãos de maior tamanho comparados aos da base. O valor da dureza voltou a crescer ao aproximar-se da região superior do flange, devida a presença de ferrita de widmanstätten.

- O flange CMT apresentou dureza média superior ao flange MADA-GMAW, porém menor que o flange tradicional.
- A amostra submergida na solução Hipo 12% apresentou menor taxa de corrosão, enquanto a amostra empregada na solução de TriCl 90% apresentou a maior taxa de corrosão.
- A amostra empregada na solução Cl₂+H₂O apresentou corrosão filiforme, pitting e uniforme. A amostra TriCl 90% também apresentou corrosão uniforme. Por fim, a amostra Hipo 12% apresentou corrosão em placas e alguns pontos de corrosão alveolar.
- A forma de corrosão da amostra CMT na solução Cl₂+H₂O foi semelhante a tubo convencional, com o surgimento de corrosão por pitting e uniforme, divergindo na corrosão filiforme.
- Para a solução Hipo 12% e TriCl 90%, a forma de corrosão da amostra CMT foi similar a MADA-GMAW, com exceção da corrosão por placas presente na solução Hipo 12%.
- O CMT mostrou ser um processo viável, superior que o MADA-GMAW e convencional, para aplicação na fabricação de componentes destinados a operação em ambientes com potencial corrosivo, como o de plantas de tratamento de água.

VI. TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos sugere-se como trabalhos futuros:

- Investigar a razão de se formar poros com 25L/min.
- Realizar a análise de formação de poros internos para diferentes concentrações de Argônio e CO₂ e também diferentes gases de proteção.
- Ampliar a investigação microestrutural do tubo utilizando técnicas como MEV, EDS e DRX.
- Investigar a viabilidade de utilização de materiais com maior resistência a corrosão, como aço inoxidável e ligas de inonel.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] GRZEGORZEK, M.; WARTALSKA, K.; KAŻMIERCZAK, B. **Review of water treatment methods with a focus on energy consumption.** International Communications in Heat and Mass Transfer, v. 143, p. 106674, 2023. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106674.
- [2] PRZYDATEK, G.; GOLONKA, M.; BARSAN, N.; MOSNEGUTU, E.; CHITIMUS, A. D.; IRIMIA, O. **Environmental and energy efficiency of a selected municipal wastewater treatment plant – a case study.** Engineering Research Express, v. 6, n. 3, p. 035003, 2024. DOI: 10.1088/2631-8695/ad6232
- [3] ENAULT, J.; LORET, J. F.; NEALE, P. A.; de BAAT, M. L.; ESCHER, B. I.; BELHADJ, F.; KOOLS, S. A. E.; PRONK, G. J.; LEUSCH, F. D. L. **How effective are water treatment processes in removing toxic effects of micropollutants? A literature review of effect-based monitoring data.** Journal of Water and Health, v. 21, n. 2, p. 235–250, 2023. DOI: 10.2166/wh.2023.235
- [4] ZAINULABIDIN, S.; ABDUL RASHID, Z.; AHMAD, M.; MOHD ZAMRI, L. H. **Chlorine-related from two (2) incidents in water treatment plant: A comprehensive review on root cause analysis.** Process Safety and Environmental Protection, v. 199, p. 107286, 2025. DOI: 10.1016/j.psep.2025.107286.
- [5] LEE, M. K.; KIM, D.; KIM, M. O. **Experimental Study on the Chlorine-Induced Corrosion and Blister Formation of Steel Pipes Coated with Modified Polyethylene Powder.** Polymers, v. 16, n. 17, p. 2415, 2024. DOI: 10.3390/polym16172415
- [6] MAWARE, C.; MUVUNZI, R.; MACHINGURA, T.; DANIYAN, I. **Examining the progress in additive manufacturing in supporting lean, green and sustainable manufacturing: a systematic review.** Applied Sciences, v. 14, n. 14, p. 6041, 2024. DOI: 10.3390/app14146041
- [7] MANSOR, M. S. M.; RAJA, S.; YUSOF, F.; MUHAMAD, M. R.; MANURUNG, Y. H.; ADENAN, M. S.; HUSSEIN, N. I. S.; REN, J. **Integrated approach to Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) optimization: Harnessing the synergy of process parameters and deposition strategies.** Journal of Materials Research and Technology, v. 30, p. 2478-2499, 2024. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.03.170.
- [8] SRINIVASAN, D.; SEVVEL, P.; SOLOMON, I. J.; TANUSHKUMAAR, P. **A review on Cold Metal Transfer (CMT) technology of welding.** Materials Today: Proceedings, v. 64, p. 108-115, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.016.
- [9] DA SILVA, L. L. FILHO, D. F. **Mechanical properties and corrosion resistance of a component manufactured by Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM).** Procedia Computer Science, 2025. DOI: 10.1016/j.procs.2025.01.145.
- [10] GUO, N.; LEU, M. C. **Additive manufacturing: technology, applications and research needs.** Frontiers of Mechanical Engineering, v. 8, n. 3, p. 215-243, 2013. DOI: 10.1007/s11465-013-0248-8.
- [11] VOLPATO, N. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D.** São Paulo: Edgard Blücher, 2017. 400 p. ISBN 978-85-212-1150-1
- [12] LAMBIASE, F.; YANALA, P. B.; PACE, F.; ANDREUCCI, E.; PAOLETTI, A. **A state of the art review of wire arc additive manufacturing (WAAM) – part 1: process fundamentals, parameters and materials.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 138, p. 4965-4993, 2025. DOI: 10.1007/s00170-025-15781-8.
- [13] TÉBIANIAN, M.; AGHAIE, S.; RAZAVIJAFARI, N. S.; ELMI HOSSEINI, S. R.; PEREIRA, A. B.; FERNANDES, F. A. O.; FARBAKHTI, M.; CHEN, C.; HUO, Y. **A Review of the Metal Additive Manufacturing Processes.** Materials, v. 16, n. 24, p. 7514, 2023. DOI: 10.3390/ma16247514.
- [14] ZHOU, L.; MILLER, J.; VEZZA, J.; MAYSTER, M.; RAFFAY, M.; JUSTICE, Q.; AL TAMIMI, Z.; HANSOTTE, G.; SUNKARA, L. D.; BERNAT, J. **Additive Manufacturing: A Comprehensive Review.** Sensors, v. 24, n. 9, p. 2668, 2024. DOI: 10.3390/s24092668
- [15] DEKIS, M.; TAWFIK, M.; EGIZA, M.; DEWIDAR, M. **Challenges and developments in wire arc additive manufacturing of steel: a review.** Results in Engineering, v. 26, p. 104657, 2025. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104657.
- [16] SHARMA, A. K.; BHANDARI, R.; AHERWAR, A.; RIMAŠAUSKIENĖ, R.; PINCA-BRETOTEAN, C. **A study of advancement in application opportunities of aluminum metal matrix composites.** Materials Today: Proceedings, v. 26,

- p. 2419-2424, 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.030.
- [17] LAMBIASE, F.; YANALA, P. B.; PACE, F.; ANDREUCCI, E.; PAOLETTI, A. **A state of the art review of wire arc additive manufacturing (WAAM) – Part 1: process fundamentals, parameters and materials.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 138, p. 4 965-4 993, 2025. DOI: 10.1007/s00170-025-15781-8.
- [18] BELLAMKONDA, P. N.; DWIVEDY, M.; ADDANKI, R.; et al. **Cold Metal Transfer technology – A review of recent research developments.** Results in Engineering, v. 23, p. 102423, 2024. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102423
- [19] VIERA, R. D. A. M.; LISKEVYCH, O.; ZIBEROV, M. **Influência da estratégia de deposição de manufatura aditiva por deposição a arco via CMT na geometria da peça: uma revisão da literatura.** Soldagem & Inspeção, v. 29, p. 10, 2024. DOI: 10.1590/0104-9224/SI29.10.
- [20] KESARWANI, S.; YUVARAJ, N.; NIRANJAN, M. S. **CMT-based WAAM: a comprehensive review of process parameters, their effects, challenges, and future scope.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 46, n. 12, p. 699, 2024. DOI: 10.1007/s40430-024-05276-0
- [21] KARIMI, J.; ZHAO, C. **Revealing the mechanism of cold metal transfer.** Communications Engineering, v. 4, article 39, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s44172-025-00378-6>
- [22] GENTIL, V. **Corrosão.** 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.
- [23] ROBERGE, P. R. **Corrosion engineering: principles and practice.** New York: McGraw-Hill, 2008.
- [24] BALASOORIYA, H.; LI, C.; WANG, F. **Understanding Steel Corrosion: Surface Chemistry and Defects Explored Through DFT Modelling—A Review.** Processes, v. 13, n. 7, p. 1971, 2025. DOI: 10.3390/pr13071971.
- [25] MARQUES, D. A.; OLIVEIRA, J. P.; BAPTISTA, A. C. **A Short Review on the Corrosion Behaviour of Wire and Arc Additive Manufactured Materials.** Metals, v. 13, n. 4, p. 641, 2023. DOI: 10.3390/met13040641
- [26] DAS, B.; PANDA, B.; DIXIT, U. S. **Corrosion Behavior and Its Effect on Mechanical Properties of ER70S-6 Cladding on AA 6061-T6 Alloy Using a Cold Metal Transfer Process.** In: DIXIT, Uday Shankar; PANDA, Biranchi (Eds.). **Advances in Cold Metal Transfer Welding Process.** Singapore: Springer, 2023. p. 19–39. DOI: 10.1007/978-981-19-8452-5_2.
- [27] DONG, Z.; TORBATI-SARRAF, H.; HUANG, C.; XU, K.; GU, X. L.; FU, C.; LIU, X.; MENG, Z. **Microstructure and corrosion behaviour of structural steel fabricated by wire arc additive manufacturing (WAAM).** Materials & Design, v. 244, p. 113158, 2024. DOI: 10.1016/j.matdes.2024.113158.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5590:2015 – Tubos de aço carbono com ou sem solda longitudinal, pretos ou galvanizados – Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- [29] ASTM INTERNATIONAL. **ASTM A370 – Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020
- [30] DING, D.; PAN, Z.; CUIURI, D.; LI, H. **A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM).** Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, v. 31, p. 101–110, 2015. DOI: 10.1016/j.rcim.2014.08.008.
- [31] HAUSER, T.; REISCH, R. T.; BREESE, P. P.; LUTZ, B. S.; PANTANO, M.; NALAM, Y.; BELA, K.; KAMPS, T.; VOLPP, J.; KAPLAN, A. F. H. **Porosity in wire arc additive manufacturing of aluminium alloys.** Additive Manufacturing, v. 41, art. 101993, 2021. DOI: 10.1016/j.addma.2021.101993.
- [32] SAHUL, M.; PAVLÍK, M.; LUDROVCOVÁ, B.; SAHUL, M.; BERÁNEK, L.; HORVÁTH, J. **Influence of argon gas flow rate on the porosity of AA5087 aluminium alloy walls made by metal inert gas wire and arc additive manufacturing.** Materials Letters, v. 399, p. 139025, 2025. DOI: 10.1016/j.matlet.2025.139025.
- [33] SHUKLA, V.; KUMAR, V.; DIXIT, A.; SATYA, S. S.; VISAKAN, S.; SHARMA, S. B. **Microstructural characteristics and tensile properties of ER70S-6 manufactured by robotic CMT wire-and-arc additive manufacturing.** Materials Today: Proceedings, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.02.011.
- [34] OLIVEIRA, C.C.F. (2022). **ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DE PEÇAS IMPRESSAS DE ARAME ER70S-6 OBTIDAS ATRAVÉS DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO VIA PROCESSO GMAW-CMT.** Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 83 p.
- [35] KARAMIMOGHADAM, M.; REZAYAT, M.; CONTUZZI, N. et al. **Effect of wire feed rate on ER70S-6 microstructure of wire arc additive manufacturing process.** Int J Adv Manuf Technol 137, 2947–2961 (2025). DOI: 10.1007/s00170-025-15334-z
- [36] SOUZA, S. A. **Ensaios mecânicos dos materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos.** 5. ed. São Paulo: Blucher, 1982.
- [37] DIRISU, P.; GANGULY, S.; MEHMANPARAST, A.; MARTINA, F.; WILLIAMS, S. W. **Analysis of fracture toughness properties of wire + arc additive manufactured high strength low alloy structural steel components.** Materials Science and Engineering A, v. 765, p. 138285, 2019. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138285
- [38] NAGASAI, P.; MALARVIZHI, S.; BALASUBRAMANIAN, V. **Effect of welding processes on mechanical and metallurgical characteristics of carbon steel cylindrical components made by wire arc additive manufacturing (WAAM) technique.** CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, v. 36, p. 100-116, 2022. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.11.005.
- [39] LOPES, G. C. **Efeito da temperatura de intercamada e da adição de arame frio em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco em aço carbono.** 2023. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Goiás, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Goiânia, 2023.
- [40] SU, W.; TIAN, Y.; PENG, S. **The influence of sodium hypochlorite biocide on the corrosion of carbon steel in reclaimed water used as circulating cooling water.** Applied Surface Science, v. 315, p. 95-103, 2014. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.07.095.
- [41] MUREŞAN, A. C.; BURUIANA, D. L.; GHISMAN, V.; HERBEI, E. E.; BOGATU, N. **Corrosion Behavior of S235JR Carbon Steel in 0.5 M HCl Solution During 24 Weeks.** Metals, v. 15, n. 10, p. 1092, 2025. DOI: 10.3390/met15101092.
- [42] SILVA, L. L. **Avaliação da Aplicabilidade da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) para Produção de Tubo de Aço Aplicado em Transporte de Cloro.** 2024. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2024. Disponível em: <repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/13824>.
- [43] CRISTOFORETTI, A.; ROSSI, S.; DEFLORIAN, F.; FEDEL, M. **Recent progress in understanding filiform corrosion on organic coated steel: A comprehensive review.** Progress in Organic Coatings, article. 108469, 2024. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2024.108469.
- [44] GAO, M.; WANG, H.; HAN, E. H. **Effect of chloride and**

- bicarbonate ions on corrosion behavior of carbon steel in anaerobic environment.** *Materials Today Communications*, v. 36, p. 106873, 2023. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106873.
- [45] ALBERT, C.; MUNDRA, S.; FURCAS, F. E.; ISGOR, O. B.; ANGST, U. **Steel corrosion in near-neutral pH electrolytes with bicarbonate, chloride, and sulfate ions.** *Electrochimica Acta*, n. 147725, 2025. DOI: 10.1016/j.electacta.2025.147725.