



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO (EMC)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA (PPGMEC)

LUCAS LAURIANO DA SILVA

**Avaliação da Aplicabilidade da Manufatura Aditiva por
Deposição a Arco (MADA) para Produção de Tubo de Aço
Aplicado em Transporte de Cloro**

Goiânia

2024



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

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 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 das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) 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 material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Lucas Lauriano da Silva

3. Título do trabalho

Avaliação da Aplicabilidade da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) para Produção de Tubo de Aço Aplicado em Transporte de Cloro.

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento 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(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);
- b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

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;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

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



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Lauriano Da Silva, Discente**, em 19/12/2024, às 12:45, 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 23/12/2024, às 15:45, 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 **5020495** e o código CRC **12DAA170**.

LUCAS LAURIANO DA SILVA

**Avaliação da Aplicabilidade da Manufatura Aditiva por
Deposição a Arco (MADA) para Produção de Tubo de Aço
Aplicado em Transporte de Cloro**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Ciências Mecânicas
Linha de pesquisa: Materiais e Manufatura Avançada

Orientador: Prof. Dr. Demostenes Ferreira Filho

Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharias Elétrica, Mecânica e de Computação

Goiânia

2024

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

Silva, Lucas Lauriano da

Avaliação da Aplicabilidade da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) para Produção de Tubo de Aço Aplicado em Transporte de Cloro [manuscrito] / Lucas Lauriano da Silva. - 2024.

CXVII, 117 f.

Orientador: Prof. Dr. Demostenes Ferreira Filho.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Goiânia, 2024.

Bibliografia.

Inclui siglas, símbolos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). 2. Tubo flangeado. 3. Corrosão. 4. Cloro. 5. ER70s6. 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 DISSERTAÇÃO

Ata nº **06** da sessão de Defesa de Dissertação de **Lucas Lauriano da Silva**, que confere o título de Mestre em **Engenharia Mecânica**, na área de concentração em **Ciências Mecânicas**.

Aos **dezesete dias do mês de dezembro de dois mil e vinte e quatro**, a partir das **09h**, no Auditório da Engenharia Mecânica, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “Avaliação da Aplicabilidade da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) para Produção de Tubo de Aço Aplicado em Transporte de Cloro”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Demostenes Ferreira Filho (UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Daniel Souza (UFG)**, membro titular interno e Professor Doutor **Paulo Rosa Mota (IFG)** membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **Demostenes Ferreira Filho**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **dezesete dias do mês de dezembro de dois mil e vinte e quatro**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Demostenes Ferreira Filho, Professor do Magistério Superior**, em 17/12/2024, às 10:54, 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 17/12/2024, às 10:57, 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 **PAULO ROSA DA MOTA, Usuário Externo**, em 06/01/2025, às 17:00, 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 **5020415** e o código CRC **4768EE2F**.

Referência: Processo nº 23070.057154/2024-21

SEI nº 5020415

Dedico este trabalho ao desenvolvimento científico proporcionado pela parceria entre indústria, universidade e sociedade.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por estar sempre me guiando para que eu possa seguir o caminho correto e por me ter dado saúde e força ao longo de toda a minha caminhada.

À minha esposa, pelo amor, paciência e compreensão, principalmente nos momentos difíceis ao longo da minha formação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Demóstenes Ferreira Filho, pelo empenho, dedicação e interesse em contribuir para o desenvolvimento do trabalho.

Aos membros da banca, pelas sugestões e dicas para a melhoria do trabalho. A todos os familiares, amigos e colegas de trabalho pelo incentivo e apoio ao longo do percurso.

À Universidade Federal de Goiás, por proporcionar um ensino de qualidade que incentiva os alunos à inovação, ao desenvolvimento e à integração social.

Agradeço ao Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação da UFG e ao Núcleo de Pesquisa em Fabricação – NUPEF do IFG, campus Goiânia, por todo o apoio oferecido para tornar este trabalho possível. Em especial, ao Professor Dr. Ildeu Lúcio Siqueira e ao engenheiro mecânico MSc. Paulo Vinícius da Silva Resende por todo o apoio e presteza ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

A todos aqueles que, de forma direta ou indireta, acrescentaram e fizeram parte da minha formação.

“Não basta dar o seu melhor, é necessário saber o que fazer e, então, dar o seu melhor.”

(Autor)

Resumo

O saneamento básico é crucial para a sociedade e a saúde pública, e a escolha de materiais para condução de cloro apresenta desafios. Este trabalho aborda a fabricação alternativa de um tubo flangeado utilizando o processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) para o transporte de cloro líquido, destacando o MADA como uma potencial alternativa. Na primeira etapa do método, a fabricação preliminar da peça buscou definir parâmetros do processo, como estabilidade e dissipação de calor na soldagem MIG/MAG e geometria, visando um formato adequado e sem defeitos, como porosidades. A segunda etapa comparou o tubo MADA fabricado com arame AWS A5.18 ER70s6 com o comercial SAE 1020 em termos de usinagem, processando dados para avaliar força de usinagem e a rugosidade foi utilizada para avaliar o acabamento. Ensaio hidrostáticos foram feitos com duas pressões: 59 bar por 10 segundos e 15 bar por 3 horas. O ensaio de tração usou amostras tubulares e um plugue para evitar deformações internas. A microestrutura foi revelada com nital a 5% e analisada em microscópio óptico. Na terceira etapa, o ensaio de corrosão entre o tubo MADA e o ASTM A106 grau B foi conduzido por 7 dias no laboratório e em serviço em uma planta de cloro líquido, avaliando perda de massa e taxa de corrosão. Os principais resultados mostraram que a parametrização possibilitou a fabricação de uma peça de boa qualidade, com geometria adequada e sem defeitos visíveis. O tubo MADA apresentou força de usinagem de 632,8 N para um avanço de 0,15 mm/rot, equiparando-se ao tubo comercial. O tubo não apresentou vazamentos no ensaio hidrostático, confirmando sua estanqueidade, e suas propriedades mecânicas são equivalentes a um material grau B, com limite de resistência de 415 MPa. A microestrutura revelou predominância de ferrita nas regiões inferiores e a presença de ferrita, perlita e outros constituintes nas superiores. No ensaio de corrosão, o tubo MADA obteve uma taxa de 0,70 mm/ano, inferior à taxa de 2,02 mm/ano do tubo atual. Nos ambientes contendo cloro com predominância de formação de ácidos fortes, o mecanismo de corrosão predominante foi uniforme, enquanto em cloretos e ácidos fracos, observou-se uma corrosão mista com presença de *pitting* (pites). Concluiu-se neste trabalho que é possível fabricar um tubo flangeado pelo processo MADA com propriedades mecânicas equivalentes e maior resistência à corrosão do que o utilizada atualmente na indústria de saneamento básico.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA); Tubo flangeado; Corrosão; Cloro; ER70s6.

Abstract

Basic sanitation is crucial for society and public health, and the choice of materials for chlorine conveyance presents challenges. This work explores the alternative manufacturing of a tube using the Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) process for transporting liquid chlorine, highlighting WAAM as a potential alternative. In the first method stage, preliminary fabrication aimed to optimize process parameters such as stability and heat dissipation in MIG/MAG welding and geometry, ensuring an appropriate shape without defects like porosities. The second stage compared the WAAM tube with the commercial SAE 1020 in terms of machining, processing data to evaluate machining force, and roughness was used to assess finishing. Hydrostatic tests were conducted with two pressures: 59 bar for 10 seconds and 15 bar for 3 hours. The tensile test used tubular samples and a plug to avoid internal deformations. The microstructure was revealed with 5% nital and analyzed using an optical microscope. In the third stage, the corrosion test between the WAAM tube and ASTM A106 grade B was conducted for 7 days in the laboratory and in service in a liquid chlorine plant, evaluating mass loss and corrosion rate. The main results showed that parameterization enabled the production of a high-quality piece with adequate geometry and no visible defects. The WAAM tube exhibited a machining force of 632.8 N at a feed rate of 0.15 mm/rev, comparable to the commercial tube. It showed no leaks in the hydrostatic test, confirming its tightness, and its mechanical properties are equivalent to grade B material, with a strength limit of 415 MPa. The microstructure revealed a predominance of ferrite in the lower regions and the presence of ferrite, pearlite, and other constituents in the upper regions. In the corrosion test, the WAAM tube achieved a rate of 0.70 mm/year, lower than the current tube's rate of 2.02 mm/year. In chlorine environments where strong acids predominantly form, the main corrosion mechanism was uniform, whereas in chlorides and weak acids, a mixed corrosion with pitting was observed. The study concluded that it is possible to manufacture a flanged tube using the WAAM process with equivalent mechanical properties and greater corrosion resistance than those currently used in the basic sanitation industry.

Keywords: Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM); Flanged pipe; Corrosion; Chlorine; ER70s6.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Vista aérea do sistema de bombeamento de água bruta do ribeirão João Leite.	8
Figura 2.2 – Diagrama simplificado de Processos MA.	9
Figura 2.3 – Ilustração das camadas na MADA.	9
Figura 2.4 – Gráfico de pressão de vapor do cloro líquido.	20
Figura 2.5 – Tipos de corrosão: (a) Chapa sem corrosão; (b) Corrosão química; (c) corrosão por <i>pites</i> ; (d) Corrosão diferencial filiforme; (e) Corrosão por erosão em fluídos; (f) Corrosão galvânica e (g) Corrosão intragranular.	23
Figura 2.6 - Taxa de corrosão para algumas ligas metálicas expostas a cloro seco.	26
Figura 2.7 – Detalhes das distâncias mínimas para ensaio e do plugue.	37
Figura 3.1 - Casa de máquinas responsável pelo bombeamento de água bruta.	41
Figura 3.2 – Dimensões (mm) do tubo: (a) Vista lateral, (b) Perspectiva isométrica e (c) amostra normalizada.	42
Figura 3.3 – Edifício de cloro: (a) Carreta tanque de cloro; (b) Interligação da carreta com o sistema de dosagem de cloro; (c) Tubo instalado e (d) Tubo sem conexão com a carreta, com flange cego.	43
Figura 3.4 – Evaporadores de cloro e tubulações acessório.	44
Figura 3.5 – Esquema para fabricação da peça por MADA.	44
Figura 3.6 – Robô manipulador utilizado na fabricação.	45
Figura 3.7 – Apresentação da fonte de soldagem e controlador do robô.	46
Figura 3.8 – Arame utilizado na fabricação das peças.	47
Figura 3.9 – Equipamentos: (a) dinamômetro no torno convencional e (b) sistema de aquisição dos sinais de forças.	49
Figura 3.10 – Conjunto ferramenta utilizado na usinagem de acabamento dos tubos.	50
Figura 3.11 – Durômetro utilizado no ensaio.	53
Figura 3.12 – Microscópio utilizado para a medição de diâmetro do ensaio de dureza.	54
Figura 3.13 – Região de medição no ensaio de rugosidade.	55
Figura 3.14 – Medição de rugosidade: (a) Equipamento de medição e (b) Esquema de medição.	56
Figura 3.15 – Montagem do tubo para o ensaio hidrostático.	57
Figura 3.16 – Equipamento para o ensaio hidrostático.	57
Figura 3.17 – Equipamento utilizado para o ensaio de tração.	59
Figura 3.18 – Plugue auxiliar utilizado no ensaio de tração dos tubos.	59
Figura 3.19 – Esquema e distâncias para o ensaio de tração.	60

Figura 3.20 – Amostras para o teste de corrosão em laboratório.	62
Figura 3.21 – Entrada do Laboratório que foi feito o ensaio de corrosão.	63
Figura 3.22 – Equipamento clorador, utilizado para dosagem de cloro.	64
Figura 3.23 – Béqueres utilizados para os ensaios de corrosão.....	64
Figura 3.24 – Balança analítica com divisão de leitura de 0,0001 g.	65
Figura 3.25 – Medidor de espessura utilizado.....	66
Figura 3.26 – Tubo MADA preparado para instalação e localização dos pontos de medição de espessura.	67
Figura 4.1 – Testes preliminares para definição da DBCP.	69
Figura 4.2 – Fabricação com variação do gás de proteção: (a) 20 l/min e (b) 31 l/min.....	70
Figura 4.3 – Fabricação preliminar com espaçamento de: (a) 6 mm; (b) 12 mm e (c) 9 mm. .	70
Figura 4.4 – Manipulador robótico fabricando peça tubular.	72
Figura 4.5 – Tubo fabricado por MADA.....	73
Figura 4.6 - Resultados experimentais: dureza medida das amostras tubulares.....	74
Figura 4.7 – Tubos: a) fabricados por MADA e b) Tubo comercial, usinados.	75
Figura 4.8 – Gráficos de força de usinagem tubo MADA: (a) sinal bruto, (b) sinal na região efetiva de usinagem e (b) RMS das forças de usinagem.	76
Figura 4.9 – Gráficos de força de usinagem tubo comercial: (a) sinal bruto, (b) sinal na região efetiva de usinagem e (b) RMS das forças de usinagem.	77
Figura 4.10 – Resultados experimentais: forças envolvidas na usinagem dos tubos.	78
Figura 4.11 – Gráfico de força para avanço de 0,15 mm/rot: (a) Tubo MADA e (b) Tubo comercial.	80
Figura 4.12 - Tubo preparado para o ensaio hidrostático.	82
Figura 4.13 - Sistema montado e pressurizado no ensaio hidrostático.....	83
Figura 4.14 - Gráfico de Tensão x Deformação dos tubos.....	84
Figura 4.15 - Microestrutura do flange do tubo MADA com aumento de 200 vezes.	85
Figura 4.16- Microestrutura do tubo MADA na região inferior com aumento de 100 vezes. .	86
Figura 4.17- Microestrutura do tubo MADA na região superior com aumento de 200 vezes. .	87
Figura 4.18 - Microestrutura do flange do tubo atual com aumento de 200 vezes.	88
Figura 4.19 - Microdureza medida das microrregiões das amostras.	89
Figura 4.20 - Dureza medida ao longo do comprimento das amostras tubulares.....	90
Figura 4.21 - Amostras no primeiro dia de exposição à corrosão.	92
Figura 4.22 - Amostras fora da solução corrosiva após 7 dias de exposição.	93
Figura 4.23 - Gráfico de barras para a taxa de corrosão das amostras	95

Figura 4.24 - Amostras após o ensaio de corrosão em laboratório: (a) MADA em Cl ₂ e água; (b) MADA em Hipoclorito de sódio; (c) MADA em tricloro; (d) Atual em Cl ₂ e água; (e) Atual em Hipoclorito de sódio; (f) Atual em tricloro.....	96
Figura 4.25 - Aumento de 50 vezes da amostra do tubo Atual exposto à Cl ₂ e água.....	97
Figura 4.26 - Aumento de 50 vezes da amostra do tubo Atual exposto ao hipoclorito de sódio.	98
Figura 4.27 - Aumento de 50 vezes da amostra do tubo Atual exposto ao tricloro.	99
Figura 4.28 - Aumento de 50 vezes da amostra do tubo MADA exposto à Cl ₂ e água.	100
Figura 4.29 - Aumento de 50 vezes da amostra do tubo MADA exposto ao hipoclorito de sódio.	101
Figura 4.30 - Aumento de 50 vezes da amostra do tubo MADA exposto ao tricloro.	102
Figura 4.31 - Instalação do tubo MADA no sistema de transporte de cloro: a) tubo conectado ao sistema de cloro mas não conectado à carreta; b) Tubo conectado à carreta de cloro.....	103
Figura 4.32 - Tubo MADA após ensaio de corrosão: a) Flange com incrustações; b) Flange sem incrustações; c) Tubo com incrustações; d) Tubo sem incrustações.....	104
Figura 4.33 - Perda de espessura dos tubos no ensaio de corrosão em serviço.....	106

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Principais propriedades do cloro.	19
Tabela 2.2 – Principais normas de cloro do <i>The Chlorine Institute</i>	33
Tabela 3.1 - Composição do arame ER70S-6.....	46
Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas do arame ER70S-6.....	46
Tabela 3.3 – Parâmetros para otimização da fabricação por MADA.....	47
Tabela 3.4 – Parâmetros de usinagem fixados e variados.	50
Tabela 4.1 – Parâmetros de deposição definidos para fabricação do tubo.	71
Tabela 4.2 – Valores de dureza medidos.	74
Tabela 4.3 – Resultado da ANOVA para a dureza das amostras fabricadas por MADA.	75
Tabela 4.4 – Resultados obtidos da força de usinagem.	79
Tabela 4.5 – Desvio padrão para os dados de força de usinagem.	79
Tabela 4.6 – Valor máximo da força de usinagem para cada amostra, para um avanço de 0,05 mm/rot.	80
Tabela 4.7 – ANOVA para os três materiais testados.	80
Tabela 4.8 - Valores obtidos na medição de rugosidade superficial.	81
Tabela 4.9 - ANOVA dos dados medidos de rugosidade.....	81
Tabela 4.10 - Interação entre os tubos para a rugosidade.....	82
Tabela 4.11 - Valores de limite de escoamento obtidos.....	83
Tabela 4.12 – Valores de microdureza medidos.....	89
Tabela 4.13 - Dureza das regiões das amostras.	90
Tabela 4.14 - Corrosão em massa: MADA.	93
Tabela 4.15 - Corrosão em massa: Atual.....	94
Tabela 4.16 - Taxa de corrosão das amostras tubulares.	105
Tabela 4.17 - Variação de espessura do Tubo MADA.....	105
Tabela 4.18 - Variação de espessura do Tubo Atual.	106

Lista de Símbolos

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AR - Arco Rotacional

ASM - *American Society for Metals*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CAD - *Computer-Aided Design*

CMT - *Cold Metal Transfer* (Transferência de Metal a Frio)

CNI - Confederação Nacional Da Indústria

DED - Deposição com Energia Direcionada

F_c – força de corte

F_f – força de avanço

F_p – força passiva

F_u – força de usinagem

HAGBs - *High Angle Grain Boundaries* (Fronteiras de Grão de Alto Ângulo)

ISO - *International Organization for Standardization*

MA - Manufatura Aditiva

MADA - Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

MAG - *Metal Active Gas*

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

MIG - *Metal Inert Gas*

NACE - *National Association of Corrosion Engineers*

NBR - Norma Brasileira Registrada

SANEAGO - Saneamento de Goiás

SLM - *Selective Laser Melting*

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

TIG - *Tungsten Inert Gas*

TM - *Test Method*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Saneamento básico	5
2.2. MADA	8
2.3. Corrosão Induzida nos aços por Cloro: Introdução, Mecanismos e Normativas	17
2.3.1. Introdução ao cloro	18
2.3.2. Principais mecanismos de corrosão	21
2.3.3. Corrosão de aços por cloro.....	25
2.3.4. Normas de cloro e de corrosão	30
2.4. Ensaio Mecânicos e Microestrutura	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1. Apresentação do problema e estrutura de fabricação.....	40
3.2. Definição dos parâmetros de deposição.....	45
3.3. Processamento pós fabricação	48
3.4. Ensaio mecânicos, Microestrutura e Corrosão	51
3.4.1. Ensaio de dureza	52
3.4.2. Ensaio de rugosidade.....	55
3.4.3. Ensaio hidrostático.....	56
3.4.4. Ensaio de tração.....	58
3.4.5. Microestrutura e microdureza	60
3.4.6. Ensaio de corrosão	61
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	68
4.1. Fabricação preliminar e parâmetros de deposição.....	68
4.2. Ensaio de Dureza, Usinagem e Acabamento da peça.....	73
4.3. Ensaio hidrostático.....	82
4.4. Ensaio de tração.....	83
4.5. Caracterização da microestrutura por microscopia óptica	84
4.5.1. Microdureza das microestruturas e dureza das regiões.....	88
4.6. Ensaio de corrosão em laboratório.....	91
4.7. Ensaio de corrosão em serviço	103
5. CONCLUSÕES	108
6. TRABALHOS FUTUROS	110
REFERÊNCIAS	111

1. INTRODUÇÃO

O saneamento básico no Brasil vem passando por evoluções significativas nas últimas décadas, principalmente no que se refere ao atendimento para a população de água potável e esgotamento sanitário. O saneamento básico está relacionado com a qualidade de vida e saúde pública local. Na região centro-oeste o acesso da população urbana à água tratada chega a 97,7% e a população total atendida é de 89,8%. Para o tratamento de esgoto a população urbana atendida é de 75,9%. No estado de Goiás, a população urbana à água tratada chega a 97,0% e a população total atendida é de 88,8%. Para o tratamento de esgoto a população urbana atendida é de 75,1%. (SNIS, 2022).

Com relação ao índice de perdas de água na distribuição a média nacional é de 37,8%. Este valor de perda corresponde a mais de um terço do volume de água é perdido, seja por vazamentos, por falhas nos sistemas de medição ou por ligações clandestinas. Goiás apresenta o menor índice de perda dos estados, com valor de 28,3%. (SNIS, 2022).

Os índices citados de população atendida e perdas de água na distribuição são alguns dos indicadores de qualidade utilizados no saneamento. E estes índices são afetados diretamente por fatores relacionados à manutenção industrial dos sistemas de saneamento. Para que o sistema industrial de saneamento possa funcionar com disponibilidade adequada e evitar paradas inesperadas no sistema, é necessário uma gestão da manutenção eficiente, incluindo a disponibilidade de peças de reposição (Kardec e Nascif, 2019).

O envelhecimento das estações de tratamento relacionadas ao saneamento básico refletem nas manutenções dos ativos que acabam por ficar mais onerosas, demoradas e trazendo prejuízos ao sistema de produção em termos de aumento das paradas inesperadas e problemas na qualidade de produção, podendo afetar a imagem da empresa (Kardec e Nascif, 2019).

Dentre os diversos sistemas existentes em uma estação de tratamento, um sistema crítico é o de desinfecção da água, que é feita pela aplicação de cloro e a parada deste sistema acarreta em parada na produção de água tratada. Segundo a BRK (2023) o cloro é uma substância utilizada para oxidar a matéria orgânica proveniente dos mananciais e que possam aparecer na rede de distribuição. Isso significa que ele elimina ou impede que bactérias, vírus e protozoários causadores de doenças surjam e se multipliquem no percurso da estação de tratamento até as residências. A Portaria da Consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde (2023) recomenda que a água fornecida contenha um teor mínimo de 0,5 mg/L e máximo de 2 mg/L de cloro residual livre.

O uso de produtos químicos no tratamento de água é parte fundamental do processo, contudo muitos destes produtos químicos, em especial o cloro e suas formas variantes e subprodutos, são corrosivos a diversos materiais. Assim, a introdução de técnicas alternativas de fabricação e utilização de materiais alternativos ou nobres podem introduzir um custo-benefício adequado para a planta (Ferreira, 2015).

O cloro é uma substância que também traz riscos a saúde dos colaboradores envolvidos na sua produção, transporte e utilização. Conforme descrito por Sabará (2022), o cloro é oxidante, podendo agravar incêndios, provoca queimaduras na pele e danos nos olhos, é tóxico ao ser inalado provocando diversos danos no sistema respiratório. Considerando o descrito, ressalta-se a importância de um sistema de dosagem de cloro confiável não só por afetar o sistema produtivo, mas também a saúde e segurança dos trabalhadores.

O uso de um tubo de aço para a condução de substâncias como o cloro apresenta desafios significativos relacionados ao desgaste e durabilidade do material. Conforme cita Kreysa e Schütze (2005), a natureza corrosiva do cloro e seus subprodutos, aliada a condições de pressão e temperatura, desempenha um papel crucial no desgaste acelerado desses tubos de aço. A frequência com que os tubos de aço utilizados para a condução de cloro precisam ser substituídos, geralmente a cada dois meses, se torna um desafio significativo em termos de logística e custos para as indústrias e processos que dependem desses sistemas. Essa necessidade de troca periódica dos tubos não apenas gera inconvenientes operacionais, mas também implica em despesas adicionais consideráveis para manter a integridade e eficiência dos processos que envolvem o transporte de cloro.

O desgaste prematuro dos tubos de aço utilizados na condução de cloro pode ser atribuído a vários fatores. Em primeiro lugar, a reatividade química do cloro, na presença de umidade, com o aço pode levar à formação de compostos que corroem progressivamente o material, enfraquecendo sua estrutura ao longo do tempo. Além disso, as condições operacionais, como a presença de impurezas ou variações extremas de temperatura, podem acelerar ainda mais o processo de desgaste.

Um sistema de saneamento básico eficiente não apenas torna o ambiente mais agradável e higiênico, mas é também essencial para a saúde pública. Através de um bom saneamento, evita-se a contaminação e a proliferação de doenças, especialmente aquelas relacionadas ao tratamento de água e esgoto, além de contribuir para a preservação e conservação do meio ambiente. O processo de desinfecção e oxidação por cloro é crucial nas estações de tratamento de água, sendo que qualquer interrupção nesse sistema, sem uma estrutura redundante, pode resultar na paralisação da produção. Um problema recorrente nesse

contexto é a corrosão dos tubos que transportam o cloro. A confecção de novos tubos pode requerer grandes instalações de conformação e usinagem, enquanto a compra desses tubos tende a ser um processo demorado devido aos procedimentos administrativos necessários para a aquisição.

A necessidade de lidar com o desgaste e a substituição frequente dos tubos de aço utilizados na condução de cloro representa um desafio que requer inovação e investimento em novas tecnologias. Buscar por materiais mais duráveis e resistentes, juntamente com a adoção de práticas de manutenção preventiva, é fundamental para assegurar a eficiência e a segurança dos sistemas que transportam substâncias corrosivas como o cloro. Por conseguinte, é de suma importância explorar técnicas de fabricação e materiais alternativos que possam não só prolongar a vida útil dos tubos, mas também viabilizar a produção de peças de reposição emergenciais. A análise da microestrutura, da resistência à corrosão e das características mecânicas das peças fabricadas desempenha um papel essencial na busca por soluções que melhorem a confiabilidade do sistema de condução de cloro.

Dentre os processos de fabricação de peças existentes, a Manufatura Aditiva (MA) tem se tornado uma alternativa com relação aos processos tradicionais, como conformação e fundição. Vimal *et al.* (2021) salientam diversas vantagens da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), como a facilidade de implementação, a capacidade de produzir peças complexas e a possibilidade de produção em grande escala graças à alta taxa de deposição. No entanto, o processo não proporciona um acabamento superficial de boa qualidade, o que torna necessário realizar outros procedimentos de fabricação após o processo de deposição.

O objetivo geral deste trabalho é a avaliar a aplicabilidade da técnica MADA para a fabricação de um tubo flangeado utilizado para realizar a conexão com a tubulação de distribuição de cloro e verificar a aplicação de materiais alternativos que possam aumentar a vida útil do tubo com custo-benefício adequado.

Os objetivos específicos são:

- Acompanhar continuamente o que se está sendo desenvolvido em termos de processo, procedimentos e resultados sobre processos MADA.
- Avaliar a aplicabilidade dos processos MADA - MIG/MAG nas estruturas e comportamentos mecânicos das peças fabricadas para o tratamento de água.
- Avaliar os impactos dos parâmetros de fabricação por MADA nos aspectos metalúrgicos, de comportamento mecânico e corrosão de peças fabricadas.

- Avaliar a força de usinagem na peça MADA e comparar com uma amostra comercial.
- Avaliar materiais alternativos que possam aumentar a vida útil do tubo.

O primeiro capítulo, Revisão Bibliográfica, apresenta os fundamentos teóricos relacionados à temática geral do estudo. Aborda-se o Saneamento Básico, essencial para a saúde pública, a MADA, uma tecnologia de fabricação inovadora, a Corrosão Induzida nos aços por Cloro, e os Ensaio Mecânicos para avaliação de propriedades dos tubos fabricados.

O segundo capítulo, Materiais e Métodos, descreve a abordagem prática adotada no trabalho. Detalhes sobre a empresa em estudo e a estrutura utilizada no trabalho são apresentados, seguidos pela definição dos parâmetros de deposição utilizados, o processo de processamento pós-fabricação e os ensaios mecânicos e de corrosão realizados.

O quarto capítulo, Resultados e Discussão, expõe e interpreta os resultados obtidos a partir das experiências conduzidas. São discutidos aspectos como a fabricação preliminar e os parâmetros de deposição adotados, o acabamento das peças fabricadas, os ensaios mecânicos realizados e os ensaios de corrosão efetuados.

Por fim, o quinto capítulo, Conclusões, apresenta as conclusões derivadas do estudo realizado. São recapitulados os principais resultados obtidos, discute-se a relevância dos achados e possíveis estudos que podem ser realizados envolvendo a fabricação por MADA e corrosão por cloro.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica abordará os principais temas deste trabalho, que são: i) Saneamento básico, que é um conjunto de medidas e políticas públicas essenciais para promover o acesso à água potável, o tratamento de esgoto, a coleta e destinação adequada de resíduos sólidos, visando garantir a saúde e qualidade de vida da população. ii) A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, é uma técnica avançada de fabricação que utiliza arco elétrico para depositar material camada por camada, possibilitando a criação de peças complexas com precisão. iii) A corrosão induzida nos aços por cloro aborda os efeitos nocivos do cloro na deterioração de estruturas metálicas, discutindo seus mecanismos e as normas associadas ao tema. iv) Por fim, os ensaios mecânicos são procedimentos utilizados para avaliar as propriedades mecânicas de materiais, como resistência, tenacidade e dureza, sendo fundamentais para garantir a qualidade e segurança de componentes fabricados.

2.1. Saneamento básico

Um saneamento básico eficiente não só torna o ambiente mais agradável e higiênico, como também é fundamental em termos de saúde pública. Com o saneamento, é possível evitar contaminações e proliferação de doenças, principalmente as ligadas ao tratamento de água e esgoto, bem como uma preservação e conservação do meio ambiente. Luna *et al.* (2017) e Barbosa (2008), descrevem o saneamento básico de maneira similar, que pode ser caracterizado como medidas adotadas em determinada localidade com o objetivo de proporcionar um ambiente saudável para os habitantes. Dentre outras ações, incluem-se o tratamento de água, esgotamento sanitário, limpeza pública de ruas e avenidas, coleta e tratamento de resíduos orgânicos e reciclagem.

O setor de saneamento no país passou por fases marcadamente distintas, com períodos de desenvolvimento mais promissores e outros marcados por fugas de investimentos, estagnação de novos projetos, investimentos insuficientes em manutenção para manter os sistemas existentes em condições adequadas e perda de profissionais técnicos com expertise para outros segmentos econômicos (Rossi e Santos, 2018).

Lopes (2017), afirma que houve um enorme avanço no saneamento básico no Brasil, apesar de cidades do interior ainda necessitarem de evolução, principalmente em termos de coleta e tratamento de esgoto. Um grande marco para o saneamento foi a Lei do saneamento básico: N.º 11.445/07 que estabelece diretrizes para o saneamento no Brasil. Assim, observa-

se a grande importância do saneamento básico para gerar melhores condições de vida à população.

Apesar de alguns momentos de estagnação, as políticas públicas de saneamento no Brasil têm lutado consistentemente para criar uma infraestrutura que resolva as deficiências dos serviços. Estudos mostram que apenas 98 cidades estão se aproximando da cobertura universal para suas necessidades de saneamento, fato que se mantém estagnado desde 2015 (SNIS 2022).

Ainda é importante destacar que o índice de perda nacional aumentou entre 2015 e 2022. De acordo com os dados mais recentes, as perdas na distribuição de água no país chegaram a ser de até 38,5% do volume total produzido. Em contrapartida, houve uma pequena redução em 2022, alcançando um valor de 37,8% (SNIS 2022).

A experiência internacional evidencia os esforços dos países desenvolvidos na redução de perdas de água, mesmo que esses índices já sejam baixos. Alemanha e Canadá são considerados líderes no manejo hídrico por utilizarem uma legislação integrada para administrar as diferenças regionais. Nos Estados Unidos, há alto investimento em saneamento básico com ênfase também nas ações do lado da demanda, incentivando o uso racional da água e mudanças paradigmas sobre recursos naturais. No México optou-se pelo reúso consciente das fontes hídricas; todavia, é um desafio fiscalizar esse processo adequadamente. Tanto Inglaterra quanto Chile mostram que o setor privado está cada vez mais envolvido nessa temática mundialmente importante. Já no Japão existe recorrentemente escassez de matérias-primas aliadas às catástrofes ambientais - fatores responsáveis pela adoção fundamental do planejamento estratégico à longo prazo como ferramenta indispensável ao seu progresso nesse cenário complicado sob perspectivas mundiais holísticas. (CNI, 2017)

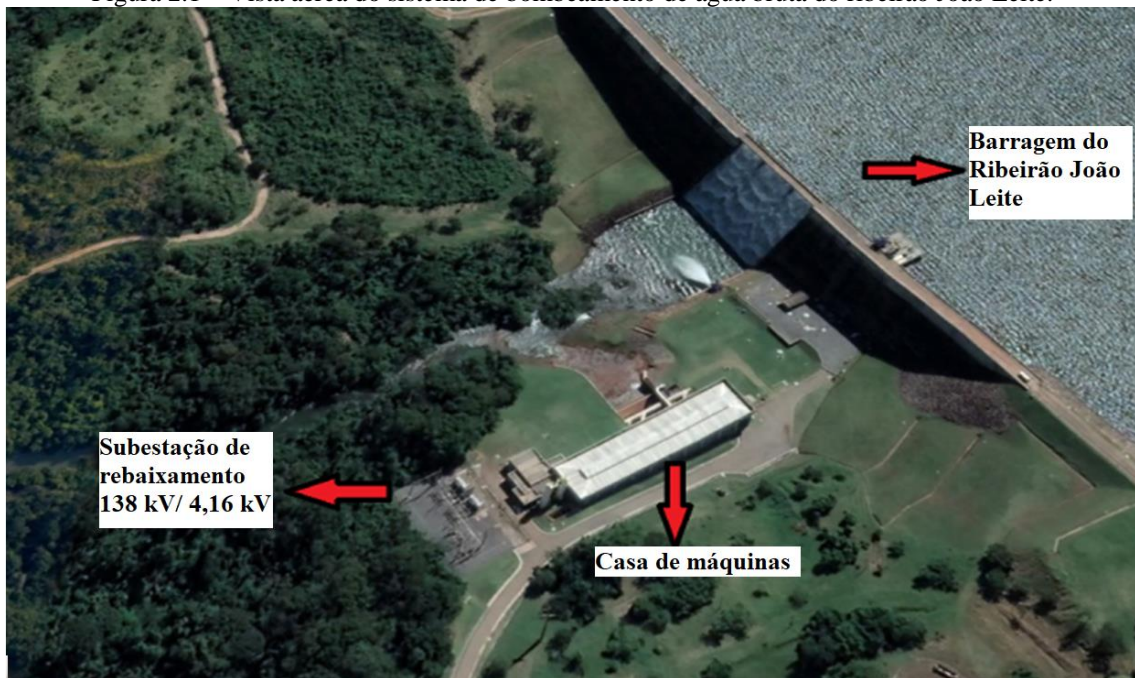
O estudo feito por Chaitkin *et al.* (2022), revela que em países em desenvolvimento carecem de melhor qualidade e atendimento nos serviços básicos de água, saneamento e gestão de resíduos. Este estudo estima que entre US\$ 6,5 bilhões e US\$ 9,6 bilhões são necessários de 2021 a 2030 para alcançar a cobertura total desses serviços nas 46 nações menos desenvolvidas, segundo a ONU. Os custos de capital variam de US\$ 2,9 bilhões a US\$ 4,8 bilhões e os custos recorrentes de US\$ 3,6 bilhões a US\$ 4,8 bilhões. A gestão de resíduos representa a maior parte dos custos, seguida de infraestrutura de saneamento, água e esgoto. As maiores necessidades estão em áreas rurais e para alcançar a cobertura total, serão necessários maiores investimentos. Embora essas necessidades financeiras sejam menores em comparação com os gastos gerais atuais em saúde e saneamento, os autores destacam que uma melhor cobertura de serviços trará benefícios substanciais para a saúde pública.

Conforme revelado no estudo de Kryston *et al.* (2024), mesmo países em desenvolvimento enfrentam dificuldades em termos de saneamento. O trabalho mostra que cerca de seis milhões de pessoas nos Estados Unidos não têm acesso a saneamento adequado devido à falta de sistemas centralizados de tratamento de esgoto ou sistemas sépticos funcionais ¹, colocando-as em risco de problemas de saúde. O trabalho foi realizado entre 2000 e 2023, com abrangência nacional nos Estados Unidos, focando em comunidades de cinco estados e levantando as barreiras sociais que afetam o saneamento local. As barreiras identificadas incluem a falta de acesso a sistemas centralizados, manutenção inadequada de sistemas sépticos e a ausência de sistemas próprios de saneamento geridos de maneira segura. O estudo recomenda revisar criticamente as legislações e políticas em níveis nacional, estadual e local para eliminar desigualdades baseadas na renda ou na composição racial das comunidades. Outras recomendações incluem maior engajamento comunitário, monitoramento dos sistemas sépticos e educação para os usuários. Também é sugerida a realização de mais pesquisas geograficamente diversificadas, incluindo comunidades específicas como trabalhadores agrícolas migrantes e pessoas sem documentação.

O sistema de saneamento básico de águas é dividido em duas vertentes básicas: i) o tratamento e distribuição de água potável e ii) o tratamento do esgoto e destinação final dos resíduos de tratamento. O sistema produtor de água tratada é, basicamente, constituído por: i) Sistema de captação de água; ii) Estação de tratamento de água; iii) Estações elevatórias de água e iv) Reservatórios de água tratada. O sistema de captação de água é constituído por um barramento do fluxo do rio ou ribeirão existente, apresentando também uma elevatória de água bruta. A água do sistema de captação de água é bombeada até a Estação de tratamento de água, em que a água bruta é tratada e reservada para distribuição. A Figura 2.1 destaca a vista aérea da Barragem do Ribeirão João Leite. (SANEAGO, 2023).

¹ São sistemas de tratamento de esgoto descentralizados geralmente usados em áreas rurais ou onde não há acesso a redes de esgoto centralizadas (Kryston *et al.*, 2024).

Figura 2.1 – Vista aérea do sistema de bombeamento de água bruta do ribeirão João Leite.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2022).

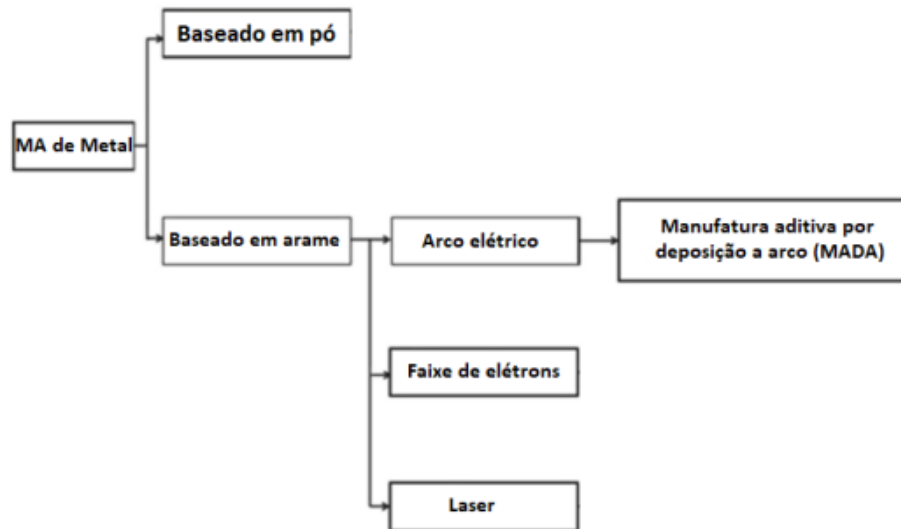
Pela Figura 2.1, é possível destacar a barragem, que estoca água bruta, a casa de máquinas, que contém equipamentos e sistemas para o bombeamento de água bruta e a subestação elétrica que alimenta a casa de máquinas.

2.2. MADA

A MA é definida pela norma ISO (*International Organization for Standardization*) / ASTM (*American Society for Testing and Materials*) 52900 (2015), como um processo de fabricação por união de materiais, em que ocorre a adição de camadas a partir de um modelo de trajetória CAD (*Computer-Aided Design* - Desenho Assistido por Computador).

A MA é ampla, conforme cita Toyserkani *et al.* (2022), os processos baseados em deposição com energia direcionada (DED) tem um destaque. Um dos processos baseados em DED é o de manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), que pode ser executado com equipamentos de soldagem e um robô manipulador ou CNC e possui um custo relativamente baixo, quando comparado com outras formas de MA, conforme relatado por Dongre *et al.* (2023), Jafari *et al.*, (2021), Bartsch *et al.* (2021). As tecnologias de soldagem mais comuns utilizadas no processo MADA são: i) *Tungsten Inert Gas welding* (TIG) e ii) *Metal Inert Gas / Metal Active Gas* (MIG / MAG) (DONGRE *et al.*, 2023). A Figura 2.2 mostra o diagrama dos processos de MA, com destaque para o MADA.

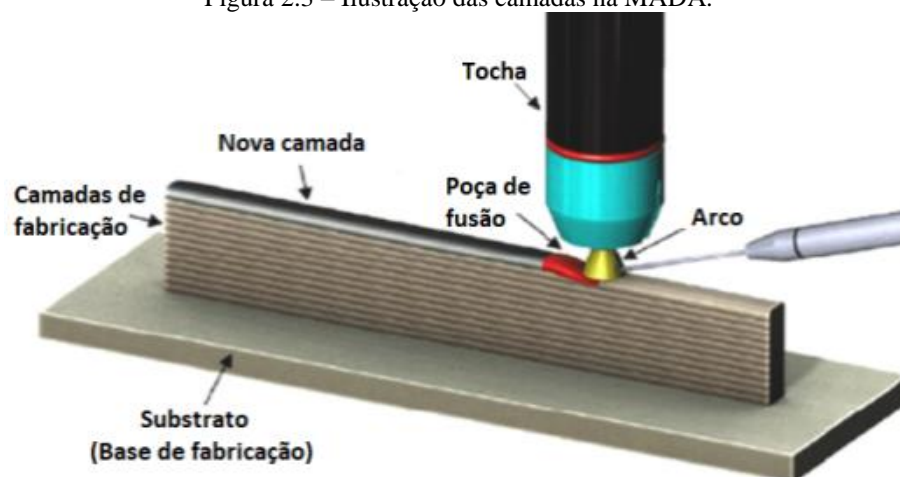
Figura 2.2 – Diagrama simplificado de Processos MA.



Fonte: Adaptado de Dongre *et al.* (2023).

A MADA utiliza arco elétrico para geração de calor e fundir o arame de um sistema de alimentação para criar as camadas de uma estrutura 3D. A Figura 2.3 ilustra o básico do processo MADA.

Figura 2.3 – Ilustração das camadas na MADA.



Fonte: Adaptado de Dongre *et al.* (2023).

A Figura 2.3 mostra o substrato, que é a base onde será feita a fabricação da peça. Este substrato pode ser aproveitado posteriormente para fabricação de outras peças. As camadas de fabricação são definidas pela trajetória do modelo 3D.

Na indústria, a soldagem MIG é uma das técnicas mais utilizadas com base no princípio do arco. Quando algum gás ativo (e.g. O_2 ou CO_2) é misturado com gás de proteção inerte (e.g. Ar ou He), a soldagem passa a se chamar *Metal Active Gas* (MAG). Sua

configuração básica consiste principalmente em uma fonte de energia, um sistema de alimentação de arame, a tocha e cilindros para fornecer o gás de proteção. O gás de proteção é importante porque evita que o oxigênio e os vapores de água reajam com o metal fundido (Scotti e Ponomarev, 2008).

O processo MIG/MAG é muito utilizado como uma técnica de MADA, uma vez que transpõe a maioria das barreiras de outros métodos de MA. Com MIG/MAG é possível ter altas taxas de deposição, pode funcionar com muitos metais e pode ser usado para fabricar peças de médio a grande porte (Feutch, 2021).

Um fator importante é a qualidade da peça produzida pelo processo MIG-MADA. Conforme relatam Casuso *et al.* (2021) e Garcia *et al.* (2020), os parâmetros do processo MIG afetam a microestrutura e propriedades mecânicas das peças fabricadas, sendo necessário a otimização destes parâmetros para obtenção de peças com qualidade adequada. A taxa de resfriamento das camadas fabricadas pode limitar alguns fatores, como tamanho e espessura da peça, e a introdução de um mecanismo de resfriamento externo pode ser necessário para a fabricação de peças maiores.

Em termos de transferência metálica relacionada ao processo MIG/MAG e a fabricação MADA, destaca-se o modo de soldagem chamado Transferência de Metal a Frio (*Cold Metal Transfer - CMT*) e o de curto-circuito, conforme citam Pattanayak e Sahoo (2021). Na Transferência de Metal a Frio, a transferência do metal de adição é realizada de forma controlada e suave, o que resulta em um aquecimento reduzido da peça e do material de adição, se assemelhando a um processo de "soldagem a frio" em comparação a outros modos de transferência.

Pattanayak e Sahoo (2021), citam que no modo CMT na MADA por deposição com MIG/MAG, um arco elétrico pulsado é utilizado entre o arame de solda e a peça, com a corrente sendo interrompida repetidamente durante a transferência para gerar gotículas de metal sem respingos significativos. Esse controle detalhado do arco e da transferência de metal resulta em menos respingos, menor distorção e menor aporte de calor, tornando a CMT indicado para soldar materiais finos, sensíveis ao calor ou com alta condutividade térmica. Esse modo é amplamente empregado em aplicações sensíveis ao calor, onde o controle preciso da transferência de metal é crucial para obter soldagens ou deposição de alta qualidade e precisão. Comparativamente, embora relacionados, o modo de Transferência de Metal a Frio difere do modo de curto-circuito ao proporcionar uma transferência mais suave e controlada, integrando o movimento preciso da tocha e da alimentação do arame. Isso resulta

em uma redução significativa de respingos, distorções e calor excessivo, tornando-o ideal para aplicações que exigem controle preciso da fusão e mínima dispersão de material.

Em contrapartida, o modo de transferência por curto-circuito na soldagem MIG/MAG e fabricação por MADA oferece vantagens em relação ao Metal a Frio em termos de custo, simplicidade, versatilidade em materiais, bom desempenho em soldagens leves e finas, controle simplificado e capacidade de soldagem em várias posições. Essas características tornam o modo de curto-circuito uma opção atraente para aplicações que não demandam alta precisão, são mais simples e envolvem materiais variados, assim como operações em diferentes posições.

Zhao (2023), cita que a retração do fio no processo de soldagem MIG/MAG por curto-circuito é utilizada para melhorar a estabilidade da transferência, reduzir o calor e minimizar respingos. Neste estudo, um modelo tridimensional foi desenvolvido para simular a soldagem aditiva de uma liga de alumínio, considerando a movimentação do fio, formação de gotículas, aquecimento do arco, fusão do metal e interação entre o fio e o substrato. Os resultados mostram que a corrente de soldagem e a distância entre o fio e a poça afetam as propriedades do arco, enquanto a influência do plasma é vital para a temperatura e fluxo do metal fundido. A energia na poça é afetada pela transferência de metal, com a velocidade máxima do fluxo ocorrendo durante o curto-circuito. O modelo destaca os benefícios de uma corrente baixa durante a transferência de gotículas, viabilizada pela retração do fio, e foi validado comparando resultados simulados com experimentais, mostrando concordância satisfatória.

Os aços de baixa liga são amplamente utilizados na indústria, e diversas técnicas de soldagem foram exploradas para a MADA, com a soldagem por Arco Rotacional (AR) demonstrando ser promissora para a melhoria das propriedades mecânicas. Estudos realizados por Justus e Senthilkumar (2024) demonstraram que a soldagem por AR pode aprimorar as propriedades de tração e reduzir a entrada de calor em comparação com as técnicas de soldagem por arco estacionário.

Justus e Senthilkumar (2024) ainda verificaram uma parede de aço de baixa liga construída por MADA, e o impacto da rotação do arco nas propriedades mecânicas e microestruturais foi examinado. Foram executados ensaios de tração em múltiplas direções, alcançando uma resistência à tração média de 550 MPa, aproximadamente 90 MPa maior do que a obtida com técnicas de arco estacionário utilizadas para fabricar o mesmo material, embora com menor alongamento percentual. Testes de microdureza realizados neste estudo

revelaram uma dureza média de 156 HV_{0,5}². A análise microestrutural indicou uma redução nos tamanhos dos grãos e uma orientação aleatória dos grãos; os gráficos de desorientação e ângulo de rotação mostraram a presença de Fronteiras de Grão de Alto Ângulo (High Angle Grain Boundaries - HAGBs), que podem ser os principais fatores para a melhoria nas propriedades de tração.

No trabalho de Justus e Senthilkumar (2023), a técnica de MA com arco rotacional e dois arames foi utilizada para fabricar aditivamente amostras de ER70S6, com 1,2 mm, inoculadas com nicromo. A resistência à tração da peça fabricada foi de 1050 MPa, sendo que a amostra sem padrão de ER70s 6 obteve 422 MPa de resistência a tração. A ductilidade foi reduzida em 27,3% em comparação com a amostra de ER70S6 não inoculada ao longo da direção horizontal. O mecanismo de fortalecimento pode ser atribuído ao efeito combinado do processo de arco rotacional e da adição de nicromo. Com a infusão de nicromo, ocorrem formações de fases secundárias que atuam como pontos de ancoragem, e ao empregar um arco rotacional, a estrutura construída exibe um tamanho de grão mais fino com estruturas entrelaçadas e limites de grão de alto ângulo. O efeito combinado auxilia na melhoria das propriedades de tração. O estudo detalhado da microestrutura revelou que as camadas reaquecidas são predominantemente bainíticas e martensíticas, enquanto as camadas depositadas são predominantemente ferríticas e perlíticas. O ensaio de corrosão, para a parte central, foi realizado usando a técnica de polarização potenciodinâmica. O estudo de corrosão revelou que a taxa de corrosão é de 0,03 mm/ano, substancialmente melhor do que as amostras não inoculadas, que possuem taxa de corrosão de 0,08 mm/ano.

O processo de Manufatura Aditiva por Deposição com Arco permite a fabricação de formas complexas, resultando em alta eficiência na utilização de material. Parâmetros de soldagem influenciam significativamente a resistência mecânica de componentes fabricados por MADA, quando submetidos a cargas estáticas ou cíclicas. A pesquisa de Karabulut *et al.* (2024) investigou o comportamento à fadiga de elementos de aço carbono fabricados por deposição com arco de fio. As amostras foram produzidas utilizando o processo de soldagem por transferência de metal frio (CMT) com aço grau S355, seguindo um procedimento de soldagem otimizado para minimizar imperfeições.

Karabulut *et al.* (2024) verificaram que um padrão de soldagem em zigue-zague melhora a qualidade da peça, assegurando movimento contínuo da tocha, entrada de calor uniforme e deposição suave do material, reduzindo defeitos. Esse padrão também promovia

² Carga de 0,5kgf utilizado na medição.

resfriamento uniforme, reduzindo tensões residuais. A estratégia de zigue-zague, envolvendo uma sobreposição de 3,5 mm e um tempo de interpasso de 5 segundos, mitigou tensões residuais e melhorou a precisão dimensional ao alternar os pontos de início e fim da soldagem para cada camada. A trajetória de soldagem inicialmente gerava o contorno externo e, em seguida, preenchia o interior em padrão de zigue-zague, melhorando a qualidade da soldagem e a precisão dimensional enquanto mitigava tensões residuais. Investigações microestruturais e experimentos mecânicos foram realizados em amostras usinadas, incluindo testes de dureza, testes de tração estática e testes de fadiga cíclica. As direções transversal e longitudinal foram testadas. As amostras MADA fabricadas com a técnica proposta e com superfícies usinadas exibem vidas à fadiga excepcionais, superando a classe mais alta de fadiga nos padrões Eurocodes, sendo atribuído a grãos finos, baixa porosidade e baixa tensão residual de tração.

O estudo realizado por Rodrigues *et al.* (2023) comparou a fabricação de revestimentos bimetálicos de ER70S-6 e Inconel 625 (IN625) utilizando processos híbridos de Manufatura Aditiva com Deposição por Arco e Deposição de Energia Direcionada por Laser. Avaliações microestruturais, utilizando nital a 4% para o ataque, na seção transversal dos revestimentos mostraram que a região de ER70S-6 construída por MADA exibiu grãos ferríticos equiaxiais, enquanto a região de IN625 depositada a laser apresentou dendritas colunares com braços secundários subdesenvolvidos. A primeira camada de IN625 apresentou dendritas colunares com braços secundários devido à difusão de Fe do material base ER70S-6 sob a ação do calor concentrado do laser.

Em termos de microestrutura e propriedades mecânicas, o estudo de Rodrigues *et al.* (2023) fez a análise de microdureza que revelou valores consistentes com as propriedades inerentes dos materiais e a interface não mostrou fases intermetálicas, conforme confirmado por testes de dureza e difração de raios-X. Testes de cisalhamento indicaram uma força de ligação superior entre os dois materiais, com uma resistência média de 452 MPa. A microestrutura do IN625 continha uma matriz de γ -Ni com segregação limitada de Nb, enquanto a base ER70S-6 apresentava uma microestrutura ferrítica intensa e uma fase rica em Fe₇Ni₃ na zona de interface. A dureza na zona de interface foi intermediária entre os valores dos materiais puros devido à fase Fe₇Ni₃, e a variação de dureza no IN625 permaneceu mínima. A ligação metalúrgica entre IN625 e ER70S-6 foi considerada excelente, com alta resistência resultante da dispersão uniforme dos elementos de liga e ausência de defeitos. A fractografia revelou entalhes e clivagens mínimas, indicando falha mista, essencial para maior vida útil em condições extremas.

Mohammadi *et al.* (2024) investigaram a criação de estruturas de parede de camada única fabricadas por MADA, utilizando arame de aço baixo carbono ER70S-6 com 0,8 mm de diâmetro. Foi analisado como a frequência dos pulsos influencia a geometria da solda, a microestrutura e as propriedades mecânicas. Para verificação microestrutural, foi utilizado um ataque com nital a 2%. As observações microscópicas identificaram uma microestrutura colunar típica, apresentando três regiões distintas: ferrita acicular, bainita e ferrita alotriomórfica nas camadas superior e inferior, enquanto a região central exibiu grãos homogêneos de ferrita poligonal com alguma perlita nas bordas dos grãos. Ensaio de tração mostraram que a resistência do material variava com a frequência dos pulsos aplicados, atingindo sua maior resistência (limite de resistência à tração de 522 MPa e limite de escoamento de 375 MPa, com ductilidade em torno de 52%) em uma frequência de 100 Hz. Ensaio de microdureza Vickers revelaram uma dureza uniforme na região central, corroborando as observações da microestrutura. A região com maior dureza apresentou valores pouco maiores que 250 HV0,2 enquanto as regiões de menor dureza obtiveram valores próximos a 150 HV0,2.

O trabalho de Goviazin *et al.* (2022) avaliou cilindros de SS316L e ER70S6, com diâmetros entre 0,8 mm até 1,4 mm, fabricados por MADA, com amostras extraídas na condição original da fabricação. Para comparação, amostras de SS316L e AISI 1020 foram usinadas a partir de barras estiradas a frio (também na condição original) e testadas de acordo. A amostra SCS de SS316L do MADA sob condições estáticas e o cilindro do MADA sob carga dinâmica mostraram uma curvatura única tensão-deformação (endurecimento) que não foi observada para o material em massa. Em contrapartida, o material ER70S6 do MADA mostrou propriedades um tanto semelhantes às do AISI 1020, indicando que pode ser um candidato adequado para reparo ou até substituição de material para o AISI 1020 em peças de MA.

Goviazin *et al.* (2022) destacam que o aço inoxidável MADA SS316L não é mecanicamente similar ao material em massa e possui um comportamento único. Isso deve ser levado em consideração ao considerar o MADA SS316L como substituto de sua contraparte em massa. O comportamento da curva tensão-deformação superior-côncava ³ único do material MADA resulta muito provavelmente de maclagens, geralmente observadas em materiais com estrutura hexagonal compacta. Embora as maclagens não tenham sido detectadas usando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), uma análise microestrutural

³ A curva de tensão-deformação do ensaio realizado apresentou um formato com alta concavidade no regime elástico, diferente de todas as outras amostras testadas.

detalhada será realizada a seguir para entender os micromecanismos de deformação subjacentes. O aumento do endurecimento deste material pode conferir estabilidade adicional durante os processos de conformação plástica. Em contraste, o MADA ER70S6 exibe um comportamento bastante semelhante ao do AISI 1020 e pode ser considerado como um material mecanicamente equivalente adequado, tanto para carregamentos quase estáticos quanto dinâmicos.

Khan *et al.* (2024) investigaram o tratamento de arco TIG para melhorar o acabamento superficial de peças fabricadas por MADA, abordando fatores superficiais como de ondulação, porosidade e dureza. O estudo investigou a influência da corrente máxima no acabamento superficial e seu impacto associado na dureza. Foi utilizado um processo híbrido MIG-TIG para aplicação do revestimento na peça MADA, o que minimizou eficientemente a ondulação, no entanto resultou em diminuição de dureza, que estava na faixa de 200 HV e reduziu para 160 HV, exigindo tratamento adicional para restaurar a dureza.

Khan *et al.* (2024) ainda destacam que a redução na dureza é esperada devido à alta transferência de calor, causando uma taxa de resfriamento lenta. A magnitude da corrente de entrada afeta diretamente as características do arco, como forma, tamanho, temperatura e estabilidade. Em correntes de arco mais baixas, o arco concentra o calor em uma área menor, o que aumenta a intensidade. Essa alta intensidade, juntamente com uma velocidade de soldagem mais rápida, cria gradientes de temperatura íngremes e resfriamento rápido. Essa taxa de resfriamento é um parâmetro crítico que governa a formação de grãos e as propriedades mecânicas da peça. Uma taxa de resfriamento mais elevada normalmente leva a um maior grau de sub-resfriamento, aumentando a força motriz para a nucleação e resultando em um maior número de sítios de nucleação. Consequentemente, isso resulta em uma estrutura de grão mais fina e aumento da dureza do material. Portanto, para recuperar a dureza, é recomendado um tratamento de arco de baixa energia com pico de corrente de 90 A.

Pattanayak *et al.* (2023), avaliaram a velocidade de soldagem e quantidade de camadas na MADA com arame ER70s6, constatando que para o acabamento superficial, velocidades reduzidas (0,17 m/min) e um aumento no número de camadas leva a uma piora no acabamento superficial. Além disso, o tamanho de grão é reduzido no topo, quando comparado a região inferior da peça, enquanto a densidade de discordâncias e a tensão residual são reduzidas. Contudo o autor cita a necessidade de avaliação de outras propriedades mecânicas e otimização dos parâmetros de produção por MADA.

Vimal *et al.* (2021) relatam outras vantagens da MADA como a fácil implementação, possibilidade de produção de peças complexas e em uma escala mais alta, devido a alta taxa

de deposição. Contudo, o processo não possui bom acabamento superficial, o que requer a necessidade de usinagem e/ou tratamento térmico pós-processamento da peça. Os fatores que afetam a usinabilidade das peças fabricadas por MADA tornam-se importantes devido a dependência que estas peças têm com usinagem final para acabamento e ajustes finos de geometria.

Chernovol *et al.* (2021) testaram a usinabilidade de peças fabricadas por MADA com arame equivalente ao ER70S6, de 1,2mm de diâmetro, e características de fabricação variadas. O estudo observou que características como velocidade de resfriamento das camadas afetam a dureza e uniformidade da superfície, o que afetam as propriedades de usinagem, como a formação de cavaco e acabamento superficial após a usinagem. O trabalho também identificou que durezas superficiais não homogêneas e baixa precisão geométrica levam a grande variação da força de usinagem, podendo ainda gerar vibrações no sistema de usinagem.

Uma das características principais da MADA de multicamadas é o aquecimento e resfriamento contínuo das camadas depositadas. Esta característica térmica também influencia a distribuição de dureza do material fabricado, o que influencia a força de usinagem durante a usinagem. Eschelbacher e Möhring (2021) analisaram a dureza e força de usinagem de amostras de aço fabricadas por MADA, verificando a influência da superposição das camadas. A dureza apresentou característica não homogênea ao longo da longitude da amostra, principalmente na região entre camadas. As forças de corte e passiva sofreram grande variação, principalmente em regiões de poros.

Montevecchia (2021) utilizou as forças de usinagem como parâmetro de usinabilidade para comparar o aço AISI H13 fabricados por MADA e o seu equivalente forjado. A dureza da peça fabricada por MADA foi superior a do material forjado. Estes valores refletiram na força de usinagem, que exibiu valores maiores na peça fabricada por MADA. Neste caso, foi mais difícil usinar o material forjado do que o por MADA.

Na usinagem, os parâmetros de corte são importantes e influenciam as características durante a usinagem e da peça usinada. A velocidade de corte, conforme cita Machado *et al.* (2015), em máquinas-ferramentas rotativas, é definida conforme a Equação 1.

$$V_c = \frac{n \cdot \pi \cdot d}{1000} \quad (1)$$

Em que: V_c – velocidade de corte (m/min), n – rotações por minuto (RPM) e d – diâmetro da peça usinada (mm).

Dixon e Walker (2023) destacam que a força de usinagem (F_u) está relacionada com a usinabilidade da peça e também com a potência de usinagem. A força de usinagem pode ser decomposta em três componentes: i) força de corte (F_c), relacionado com a direção de corte, ii) força passiva (F_p), perpendicular a direção do avanço e iii) força de avanço (F_f), na direção do avanço. Assim, a força de usinagem pode ser definida pela Equação 2.

$$F_u = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \quad (2)$$

Em que: F_u – força de usinagem (N), F_c – força de corte (N), F_f – força de avanço (N) e F_p – força passiva (N).

Um fator importante na usinagem é a escolha adequada do conjunto de ferramenta que irá efetuar o corte da peça fabricada. Em termos de normas, a ABNT NBR ISO 1832 (2019) fornece a base para a definição da estrutura e identificação dos insertos, enquanto as classificações da ABNT NBR ISO 513 (2015), K01-K15 e P01-P15, fornecem a indicação de aplicação adequada para esses insertos. Juntos, eles proporcionam um sistema abrangente e padronizado para a seleção e uso de ferramentas de corte na indústria de usinagem.

A ABNT NBR ISO 1832 (2019) é uma norma que especifica o sistema de designação para ferramentas de corte com insertos intercambiáveis, particularmente insertos de metal duro, cerâmicas, nitreto cúbico de boro (CBN), diamante policristalino (PCD), entre outros. Esta norma fornece uma nomenclatura que detalha a forma do inserto, o seu ângulo de folga, a tolerância dimensional, a geometria da face e o sistema de manutenção/raster (quebra-cavacos). A norma cobre aspectos como: forma do inserto, ângulo de folga, tolerância, tipo de quebra-cavacos e material.

As designações K01-K15 e P01-P15 são usadas para indicar as classes de desempenho dos insertos de acordo com a sua aplicação em diferentes materiais e condições de usinagem, sendo as *K Grades* (K01-K15) voltadas para a usinagem de fundidos e materiais não ferrosos, e as *P Grades* (P01-P15) para a usinagem de aços e aços fundidos.

2.3. Corrosão Induzida nos aços por Cloro: Introdução, Mecanismos e Normativas

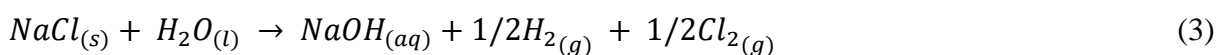
A utilização do cloro em diversas indústrias é amplamente difundida devido às suas propriedades desinfetantes e oxidantes. No entanto, o manuseio e a condução deste elemento

apresentam sérios desafios, principalmente relacionados à corrosão dos materiais, como os tubos de aço. Entender os principais mecanismos de corrosão é essencial para mitigar os danos e prolongar a vida útil dos equipamentos. A reação agressiva do cloro com o aço pode acelerar processos corrosivos, comprometendo a integridade das estruturas utilizadas.

Além do embasamento técnico sobre os tipos de corrosão, é vital estar ciente das normas regulamentadoras que orientam o manuseio do cloro e as especificações para materiais resistentes à corrosão. Essas diretrizes são importantes para garantir a segurança e eficiência dos sistemas de condução de cloro, reduzindo custos de manutenção e riscos operacionais.

2.3.1. Introdução ao cloro

Casimiro (2011) O cloro é um elemento conhecido por sua forte reatividade com uma ampla gama de metais. Principalmente quando combinado com agentes redutores e materiais inflamáveis, também apresenta sua natureza reativa quando entra em contato com metais em pó e diversas substâncias como acetileno, hidrogênio, hidrocarbonetos de amônia, e matéria orgânica. Além disso, este produto químico tem potencial para causar reações explosivas quando encontra produtos inflamáveis, pós metálicos ou qualquer forma de material orgânico. Vale ressaltar que o cloro pode corroer certos materiais na presença de umidade, como o titânio. Portanto, as formas gasosas de cloro devem ser armazenadas em condições secas. O Processo de produção de cloro mais comum é pela passagem de corrente elétrica em uma solução de água e cloreto de sódio, chamado de eletrólise da salmora, apresentado pela equação global, ocorrendo a formação de hidróxido de sódio além do cloro. A Equação 3 apresenta a reação.



Quando submetido às condições ambientais de temperatura e pressão atmosférica, o cloro manifesta-se como um gás. Este composto apresenta uma tonalidade amarelo-esverdeada característica que é facilmente perceptível em sua forma gasosa. Devido a suas propriedades químicas peculiares, este elemento é comercializado comumente em cilindros fabricados com aço de alta resistência, já que se encontra na forma líquida sob grandes níveis de pressão. Convém salientar ainda que tal comportamento físico-químico deste produto na

forma líquida ocorre somente acima de 6,7 bar à temperatura de 20 °C. A Tabela 2.1 mostra algumas propriedades do cloro (*The Chlorine Institute, 2023*).

Tabela 2.1 – Principais propriedades do cloro.

Número atômico	Peso atômico	Peso molecular	Densidade de vapor (20 °C)	Densidade de líquido (20 °C)	Ebulição a 1 atm	Fusão	Pressão de vapor a 20°C	Relação volume líquido e gás (0°C e 1 atm)
17	35,45 u	70,91	1410 kg/m ³	2490	-34°C	-101°C	6,7 bar	457

Fonte: *The Chlorine Institute (2023)*.

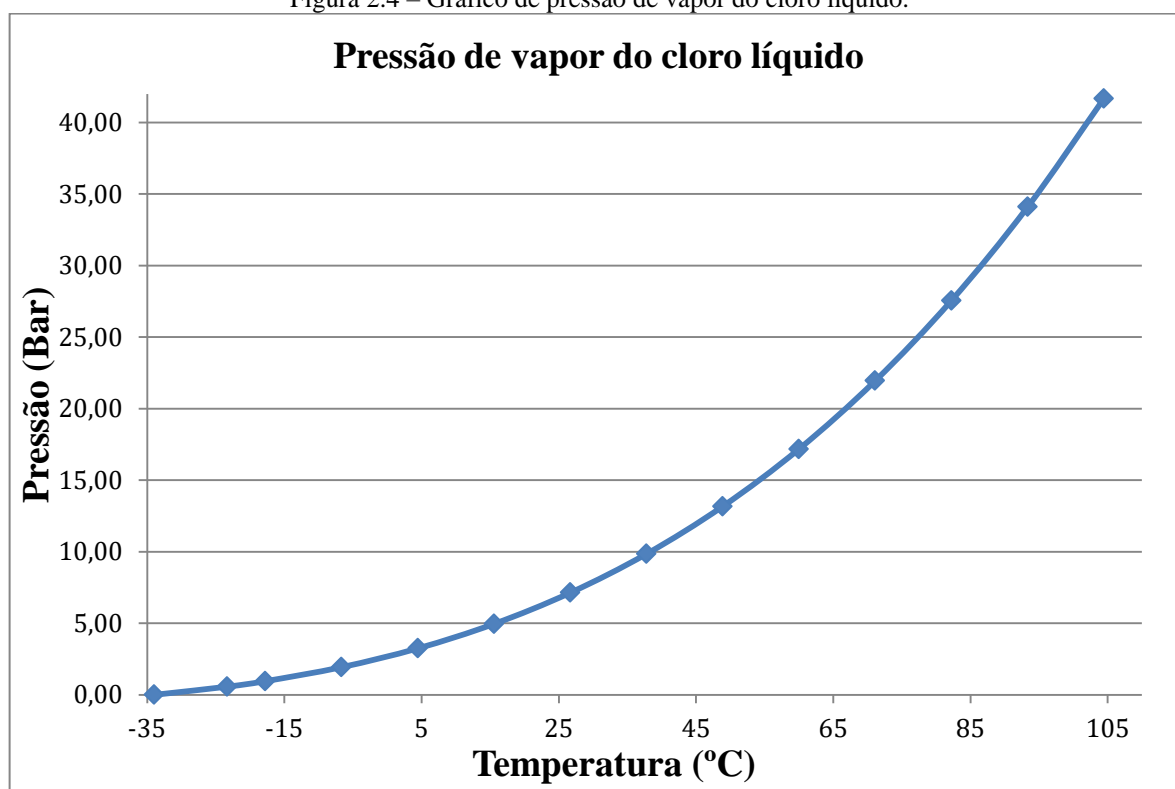
Outra característica relevante do cloro é sua solubilidade em água, que varia principalmente de acordo com a temperatura e a pressão. Em condições normais, a capacidade de dissolução do cloro gasoso (Cl₂) na água é de aproximadamente 7,2 g/L a 20°C e 1 atm de pressão. No entanto, essa solubilidade pode aumentar quando a temperatura diminui e/ou a pressão aumenta. Em condições ideais, a concentração da solução de cloro pode atingir até 1%, ou 10.000 mg/L. Na prática, em sistemas de dosagem de cloro que utilizam injetores com pressão negativa, a solubilidade máxima alcançável é cerca de 3.500 mg/L (Craig e Anderson, 2002).

O cloro dissolvido em água pode reagir com a água para formar ácido hipocloroso (HClO) e ácido clorídrico (HCl). O ácido hipocloroso é uma espécie química instável que se forma temporariamente e pode se decompor em ácido clorídrico e oxigênio. O ácido clorídrico resulta da dissolução do gás cloro em água, formando íons H⁺ e Cl⁻. A equação química mostra os principais produtos formados na solução de cloro com água, em que ocorre a formação de ácido clorídrico e ácido hipocloroso. A equação 4 mostra a reação química básica que ocorre nesta solução (Craig e Anderson, 2002).



É importante também diferenciar entre os termos "cloro seco" e "cloro úmido": o primeiro termo é utilizado quando a concentração de água no cloro é inferior a 150 ppm, enquanto o segundo se refere a situações em que esse valor é superior, o que provoca a formação de ácidos que corroem a maioria dos metais (Craig e Anderson, 2002). A Figura 4 mostra o gráfico de pressão de vapor do cloro líquido.

Figura 2.4 – Gráfico de pressão de vapor do cloro líquido.



Fonte: *The Chlorine Institute* (2023).

Gonçalves (2013) relata que o cloro está envolvido em reações rápidas que ocorrem em ambientes atmosféricos e em solos onde está presente matéria orgânica, como plantas em decomposição. Quando as moléculas de cloro interagem com a água, formam ácidos clorídrico ou hipocloroso, dependendo dos níveis de pH. É importante tratar adequadamente as águas residuais que contêm impurezas para evitar a formação de cloraminas. Nos recursos naturais de água doce, o cloro pode ser encontrado em concentrações residuais em torno de 100 mg/l, a menos que haja outros sais neutros presentes, como sulfato de magnésio ou sulfato de sódio, que podem afetar significativamente as leituras. É crucial compreender que a presença destes compostos eletrolíticos pode levar ao aumento da corrosão. Esta informação é essencial para compreender como a estabilidade de um sistema hídrico nativo pode ser comprometida por fenômenos intermoleculares, mesmo na ausência de poluição.

É importante entender a diferença entre cloro e hipoclorito de sódio, já que ambos os produtos são utilizados para desinfetar água. No entanto, vale ressaltar que há diversas semelhanças e distinções desde o processo utilizado em sua produção até, inclusive, suas concentrações especiais. O cloro possui 100% desta substância presente na molécula depois do método da eletrólise ser aplicado. O início dele surge no estado gasoso, que posteriormente após atingir temperaturas e pressões definidas, passará ao estado líquido. O cloro serve vários

propósitos além do seu conhecido papel como desinfetante. Acontece que o cloro é comumente empregado em vários processos industriais e reações químicas para produzir compostos essenciais como o hipoclorito de sódio. Este composto pode ser obtido através da reação de solução diluída de soda cáustica com cloro gasoso. O hipoclorito de sódio desempenha uma função importante na indústria, agindo como um precursor para a produção de desinfetantes poderosos que são amplamente utilizados para manter os padrões de higiene em diferentes campos de aplicação, inclusive no tratamento de água. Este valioso composto normalmente se manifesta na forma líquida, apresentando concentrações na faixa de 10% (Bernado *et al.*, 2017).

Conforme citam Bernardo *et al.* (2017) e Tsutiya (2006), o sistema de dosagem de cloro é composto por um local de armazenamento de cloro, que pode ser cilindros de menor capacidade útil, até 100 kg, cilindros grandes, com capacidade entre 900 kg e 1000 kg, e em carretas de tanque de carga, sendo caracterizado como cloro líquido a granel e possui capacidade útil acima de 10000 kg. Além do sistema de armazenamento é necessário um sistema de transporte de cloro para as outras etapas do processo de dosagem, que é feito através de tubulações, que geralmente são metálicas. Para sistemas que utilizam cloro líquido, é necessário um sistema de evaporadores para posterior dosagem do cloro na água.

2.3.2. Principais mecanismos de corrosão

O conceito de corrosão aplica-se a materiais metálicos e não metálicos, abrangendo diferentes formas de deterioração. Nos metais, a corrosão refere-se à degradação devido a processos químicos ou eletroquímicos, podendo ocorrer sem esforços mecânicos. Em ambientes naturais, a corrosão eletroquímica é a mais comum, envolvendo a geração de elétrons em reações do metal ao entrar em contato com o ar ou oxigênio sem a presença de água. Essa forma de corrosão, também chamada de "corrosão seca" ou "corrosão quente", resulta de reações oxidantes entre metais e gases a temperaturas acima de 100°C, mas também pode ocorrer em temperaturas ambiente na presença de certos líquidos. Com o aumento da temperatura do metal, sua oxidação se intensifica. Esse tipo de corrosão é uma reação química entre o metal e o agente corrosivo, sem movimentação de elétrons, comum em fornos e caldeiras. É menos frequente na natureza, pois não envolve reações de oxidação-redução que geram corrente elétrica, predominando em altas temperaturas e sendo caracterizada pela ausência de água líquida e temperaturas superiores ao ponto de orvalho da água (Roberge, 2012).

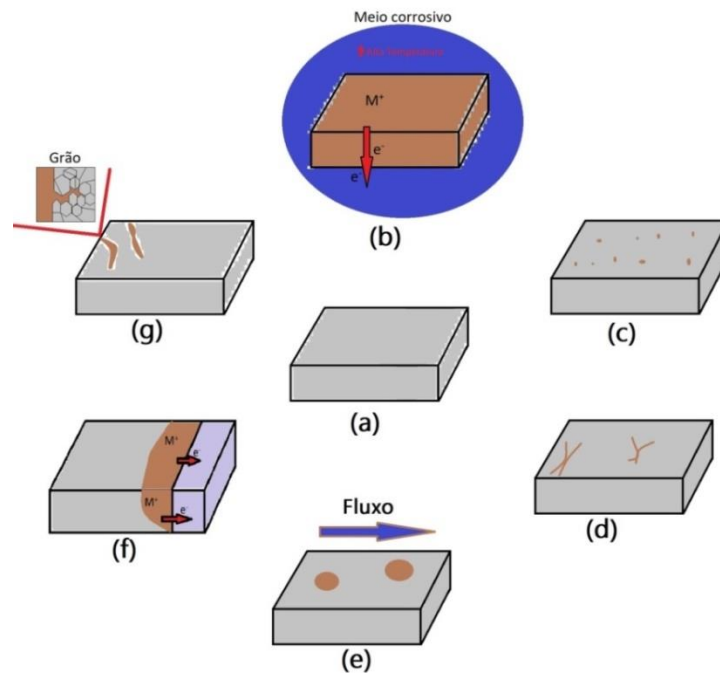
O processo de corrosão eletroquímica é o mais comum na natureza e requer a presença de um eletrólito. Este mecanismo envolve uma reação anódica (oxidação), que libera elétrons, e uma reação catódica (redução), que absorve esses elétrons. A reação anódica resulta na dissolução do metal ou sua transformação em óxidos ou sulfitos, enquanto a reação catódica reduz as espécies presentes no meio, absorvendo os elétrons até que um equilíbrio seja atingido, cessando o processo de corrosão. Esse fenômeno é similar ao funcionamento de uma pilha de corrosão (Roberge, 2012).

Na atmosfera, contaminantes como óxidos de enxofre, especialmente o dióxido de enxofre (SO_2), influenciam significativamente a corrosão de aços e zinco. O dióxido de enxofre surge principalmente da oxidação do ácido sulfídrico, gerado pela decomposição de compostos orgânicos com enxofre e pela queima de combustíveis contendo enxofre. Diversos contaminantes contribuem para a corrosão em atmosferas industriais, mas o dióxido de enxofre é o mais relevante. Este contaminante, presente nas partículas de poeira, oxida-se através de um processo catalítico, formando ácido sulfúrico que se deposita na superfície dos materiais como minúsculas gotículas, junto com dióxido de enxofre e ácido sulfuroso. As atmosferas urbanas são semelhantes às industriais, embora menos agressivas (Pannoni, 2015).

A superfície do material geralmente revela o tipo de corrosão presente, com mecanismos eletroquímicos envolvendo zonas catódicas e anódicas, onde fluem correntes de elétrons e íons. Diferentes tipos de corrosão variam pela perda de massa e pelo modo como os materiais são afetados (Kaesche, 2003).

Uma superfície metálica em contato com um ambiente corrosivo pode sofrer um tipo específico de deterioração conhecido como corrosão localizada, que resulta na redução da sua espessura. Esse tipo de corrosão, que também é chamada de uniforme, é principalmente causado por "micropilhas" de natureza local, onde a diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo é originada por impurezas, segregações ou modificações físicas no metal. Considera-se esse tipo de corrosão como um dos mais comuns entre todos os processos existentes, especialmente quando um meio corrosivo entra diretamente em contato com a superfície do material. Por outro lado, a corrosão uniforme, onde a diminuição da espessura ocorre de maneira equilibrada em toda a superfície do material, é mais fácil de ser monitorada (Kaesche, 2003). A Figura 2.5 mostra alguns diferentes tipos de corrosão em uma chapa metálica.

Figura 2.5 – Tipos de corrosão: (a) Chapa sem corrosão; (b) Corrosão química; (c) corrosão por *pites*; (d) Corrosão diferencial filiforme; (e) Corrosão por erosão em fluidos; (f) Corrosão galvânica e (g) Corrosão intragranular.



Fonte: Adaptado de Kaesche (2003), Kreysa e Schütze (2005) e Renzo (1985).

A corrosão química ou seco ocorre em ambientes sem água e geralmente em temperaturas elevadas, garantindo energia suficiente para a reação, ao contrário do que ocorre em temperatura ambiente, conforme cita Kreysa e Schütze (2005). Esse tipo de corrosão resulta da interação direta entre o meio corrosivo e o metal, ocorrendo tipicamente em processos associados a altas temperaturas. É uma forma de corrosão ou oxidação frequentemente observada em ambientes industriais, especialmente em equipamentos que operam em altas temperaturas, como fornos, caldeiras, e assim por diante.

A corrosão por picada, também chamada de corrosão por: *pites* (do termo em inglês: *pitting*), alveolar ou puntiforme é um tipo de deterioração específica que ocorre em pontos particulares da peça, formando cavidades pequenas, porém com profundidade considerável. Geralmente, essa forma de corrosão não deixa marcas visíveis no restante do material. Essa corrosão frequentemente afeta materiais passiváveis quando a camada protetora é danificada, levando à corrosão nessa região. ASM (2003) revela que a monitoração desse tipo de corrosão apresenta desafios, pois o controle através da perda de peso não é indicativo do desgaste real. As cavidades se desenvolvem em áreas frágeis da camada protetora, onde ocorre uma mudança de pH para valores mais ácidos, dificultando a regeneração da camada protetora.

Essa área pequena torna-se ativa em relação a uma área catódica maior, resultando em corrosão intensa e localizada.

A corrosão por concentração diferencial é o tipo de degradação das peças que provoca corrosão localizada. Esse processo corrosivo é desencadeado pela variação de determinados agentes presentes no meio corrosivo, sendo os principais processos: corrosão filiforme, corrosão por aeração diferencial, corrosão por concentração iônica diferencial e corrosão em fendas (Kreysa e Schütze, 2005).

Durante o fluxo de líquidos, ocorre a corrosão por erosão em fluidos, onde os processos corrosivos podem ser potencializados pela combinação do efeito mecânico com a ação corrosiva. Diversos tipos de corrosão ligados ao escoamento de fluidos podem ser identificados, incluindo principalmente: corrosão com cavitação, corrosão-erosão e corrosão por turbulência (Renzo, 1985).

A corrosão galvânica ocorre devido ao contato elétrico entre dois materiais distintos ou em um material não homogêneo. Quanto maior for a diferença de potencial eletroquímico entre os elementos distintos, mais intensa será a corrosão. Uma maneira eficaz de proteger esses materiais é minimizar a relação eletroquímica. Outro ponto relevante nesse tipo de corrosão é a presença de íons metálicos no eletrólito, que pode desencadear corrosão ao reduzir os íons presentes no meio, resultando na oxidação do metal, especialmente quando os íons no eletrólito são mais catódicos do que aqueles que entram em contato posteriormente (Pannoni, 2015).

A corrosão intergranular ocorre ao longo das interfaces dos grãos, seguindo o trajeto dessas regiões e separando-se durante o processo de corrosão. A discrepância na composição química entre a matriz e o material adjacente ao contorno é o principal fator que influencia a resistência à corrosão. Este tipo de deterioração não exige a presença simultânea de um meio corrosivo e esforços mecânicos, ao contrário do que ocorre na corrosão sob tensão. Mesmo que a capacidade de formar uma camada passiva não seja completamente eliminada devido à alteração química, observa-se a ocorrência de uma corrente de corrosão provocada pela diferença de potencial gerada pelas características distintas dos materiais. Geralmente, não é possível identificar esse tipo de corrosão somente por meio de ensaios metalográficos, sendo necessário utilizar outros ensaios, como de sensibilização⁴ ou dobramento e sensibilidade a trincas (Pannoni, 2015).

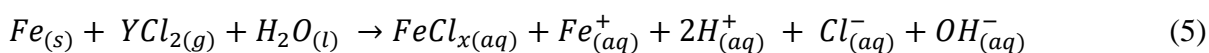
⁴ Ensaio que consiste principalmente na submersão de pequenos corpos de prova em soluções ácidas aquecidas (ASTM A262).

Na corrosão sob tensão, são formadas fissuras no material, que podem ser intergranulares quando o caminho de corrosão segue o contorno dos grãos ou transgranulares quando a corrosão se propaga pelo interior dos grãos. Esse processo de corrosão, geralmente lento, se desenvolve até atingir o tamanho crítico, levando eventualmente à fratura. A corrosão sob tensão requer que dois fatores ocorram simultaneamente: o material deve estar submetido a tensões de tração e em contato com um ambiente corrosivo específico. Propriedades mecânicas como dureza, encruamento, entre outras, desempenham um papel significativo na escolha do material para uma aplicação particular, sendo crucial que a tensão de tração seja sempre superior a um valor limite determinado (Kreysa e Schütze, 2005).

2.3.3. Corrosão de aços por cloro

A corrosão de aços por cloro úmido é um fenômeno de grande importância na indústria e em diversas aplicações onde o aço está exposto a ambientes contendo cloro em forma gasosa ou dissolvido em água. O cloro é um agente altamente corrosivo e pode acelerar significativamente o processo de deterioração do aço.

Quando o cloro está presente, geralmente em forma de cloro úmido (cloro dissolvido em água), ele pode desencadear vários mecanismos de corrosão nos aços, tais como corrosão eletroquímica, corrosão por pite, corrosão sob tensão e corrosão por fragilização. O ácido hipocloroso e o ácido clorídrico formados a partir da dissolução do cloro são agentes corrosivos que atuam na superfície do aço, levando à degradação do material. A equação química apresentada na Equação 5 mostra a reação entre o ferro e o cloro dissolvido em água (Talbot D. e Talbot J., 2018).



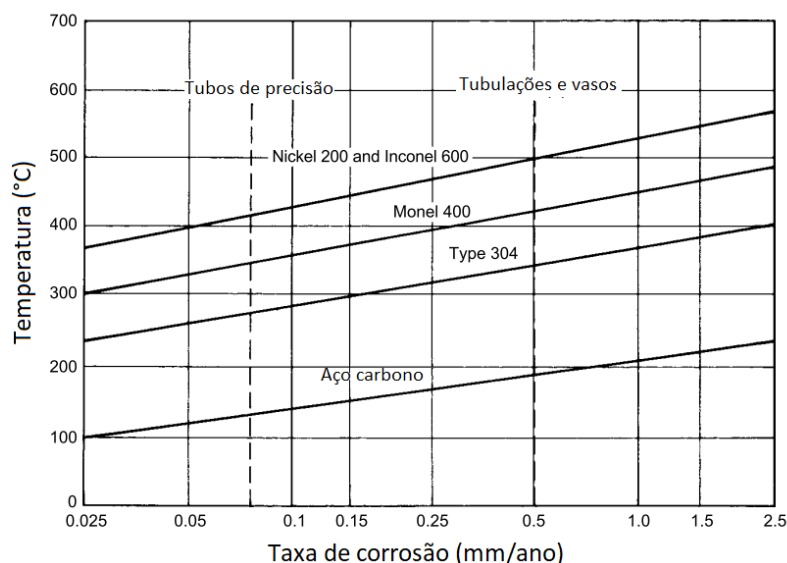
A Equação 5 é uma representação genérica da corrosão do aço em contato com cloro úmido, sendo os índices estequiométricos Y e X variáveis, conforme condições e concentrações da reação. O aço (Fe) reage com o gás cloro (Cl₂) e a água (H₂O) para formar cloreto de ferro genérico (FeCl_x), íons hidrogênio (H⁺) e íons cloreto (Cl⁻), o que demonstra o processo de corrosão do aço em presença de cloro úmido. Os íons hidroxila (OH⁻) se formam, contribuindo para a produção de hidróxidos de ferro ou outros produtos de corrosão dependendo do pH e outras condições. Nesta reação, ainda pode ocorrer a formação de gás hidrogênio, que geralmente é visto como uma efervescência na solução. O Principal ácido corrosivo formado neste caso é o ácido clorídrico, mas também ocorre a formação de ácido

hipocloroso. No caso de uma reação corrosiva do ferro pela solução aquosa de hipoclorito de sódio, ocorre a formação dos ácidos hipocloroso com predominância, além de outros subprodutos. Também ocorre a formação de ácido clorídrico, porém este é mais instável (Revie e Uhlig, 2008).

Na corrosão do ferro por uma solução de cloro diluído em água, o produto formado pode ser óxido de ferro (III) (Fe_2O_3) ou hidróxido de ferro (III) [$\text{Fe}(\text{OH})_3$], que são comuns em reações de oxidação do ferro em presença de água e oxigênio. Na corrosão do ferro por hipoclorito de sódio, o produto formado pode incluir cloreto de ferro (II) (FeCl_2) devido à interação do ferro com o ácido clorídrico produzido a partir do hipoclorito de sódio. Portanto, nestes casos, os produtos que contêm ferro formados podem variar, com FeCl_2 sendo mais provável para a variável “x” (FeCl_x) na corrosão do ferro por hipoclorito de sódio e compostos de óxido de ferro em soluções contendo cloro e água (Revie e Uhlig, 2008).

A taxa de corrosão é essencial para avaliar a durabilidade de materiais metálicos em ambientes agressivos. O aço carbono exibe uma taxa de corrosão baixa, abaixo de 0,0025 mm/ano, quando exposto a cloro seco a temperaturas abaixo de 250 °C, tornando-o estável em condições secas. No entanto, a presença de umidade aumenta significativamente a taxa de corrosão em ligas metálicas, incluindo o aço carbono e o aço inoxidável, devido a reações eletroquímicas que aceleram a degradação do material. O aço inoxidável Type 304 apresenta uma taxa de corrosão elevada de 30,5 mm/ano na presença de cloro e umidade a uma temperatura de 40 °C. (ASM, 2003). A Figura 2.6 mostra a taxa de corrosão por cloro seco de algumas ligas metálicas em função da temperatura.

Figura 2.6 - Taxa de corrosão para algumas ligas metálicas expostas a cloro seco.



Fonte: Adaptado de ASM (2003).

A Figura 2.6 mostra que várias ligas metálicas têm baixa taxa de corrosão em cloro seco. No entanto, o Monel 400, uma liga de níquel e cobre, é suscetível à forte corrosão em cloro úmido, onde a combinação de cloro e umidade pode acelerar sua degradação. O aço inoxidável apesar da baixa taxa de corrosão em ambientes secos expostos ao cloro seco em altas temperaturas, pode enfrentar problemas como corrosão sob tensão, corrosão localizada e corrosão galvânica em presença de umidade e subprodutos do cloro. Assim, é crucial considerar o impacto da umidade e do cloro ao escolher materiais para aplicações específicas. A proteção contra corrosão e a seleção adequada das ligas são essenciais para garantir a durabilidade e segurança dos componentes metálicos em condições adversas (ASM, 2003).

Estudos que avaliam a corrosão por cloro e peças fabricadas por processo MADA ainda são escassos. No trabalho de SURDASAN *et al.* (2023) foi avaliado a corrosão de peças produzidas por MADA-MIG e arame ER70s6. O estudo foi feito comparando as camadas inferiores, intermediárias e superiores, sendo que a corrosão ocorreu em taxas maiores na região intermediária, seguido pela região superior e inferior. O principal aspecto que foi atribuído a este resultado é a formação de uma maior camada de perlita lamelar, o que levou a uma baixa resistência à polarização e no desenvolvimento de um filme passivo menos compacto. Li *et al.* (2022) avaliaram a corrosão do aço S500AW e do Q345B em tanques de cloro e ácido sulfúrico e características mecânicas pós corrosão. Os autores realizaram o estudo da massa perdida no tanque de imersão após o ataque de corrosão e também avaliaram a microestrutura resultante com morfologia macroscópica e microscopia eletrônica de varredura.

Bozkurt *et al.* (2024) investigaram a influência de superfícies texturizadas em peças de aço inox 316L na resistência à corrosão eletroquímica em processos de Fusão Seletiva a Laser de Pó (SLM - *Selective Laser Melting*). Experimentos de corrosão foram realizados em água do mar, utilizando um sistema de célula de três eletrodos. Os resultados mostraram que as superfícies texturizadas ótimas tiveram melhor desempenho de resistência à corrosão em comparação com amostras forjadas. A densidade máxima de textura proporcionou os melhores resultados, enquanto o aumento excessivo da textura enfraqueceu a resistência à corrosão. As amostras foram testadas em relação a geometrias e densidades de textura variadas, com resultados similares entre amostras produzidas pelo método SLM e convencionalmente.

O estudo feito por Yang *et al.* (2024) verificou os processos de dissolução das fases ricas em cobre e seu efeito sinérgico com outras fases precipitadas para a fabricação de aços inoxidáveis com alta resistência à corrosão. O trabalho investigou o efeito das fases ricas em

cobre na resistência à corrosão de aços inoxidáveis duplex 2205 contendo cobre. Foi observada uma diminuição na resistência à corrosão à medida que o tamanho das fases ricas em cobre aumentava. A dissolução preferencial dessas fases comparada à matriz de aço foi notada, resultando em melhoria da estabilidade da corrosão e da resistência à corrosão da liga. A presença de outras fases, como carburetos de cromo e fases sigma, também influenciou a resistência à corrosão do aço inoxidável.

Bai *et al.* (2018) realizaram um estudo visando proteger aços inoxidáveis 304 da corrosão por cloro em caldeiras de biomassa através de revestimentos de β -NiAl que formam alumina, aplicados por aspersão térmica de alta velocidade com oxi-Combustível⁵. Durante o teste de corrosão a 700 °C por 250 horas em ambiente simulado com 5% de O₂, 500 ppm de ácido clorídrico, N₂ e depósito de KCl a 10%, observou-se corrosão severa com crescimento rápido de Al₂O₃ na interface NiAl-aço, partindo das bordas para o centro. O mecanismo proposto sugere que o Cl₂, atuando como catalisador, promove a formação de NiCl₂ e AlCl₃ gasosos, sua oxidação e evaporação ao longo da interface, impulsionando o crescimento de Al₂O₃. O estudo salientou a efetividade dos revestimentos de NiAl na proteção contra corrosão, enfatizando a importância de evitar a exposição direta à combinação de Cl₂ com o O₂ para prevenir a depleção de Al e a transformação em γ' -Ni₃Al após serviço prolongado. O resultado apontou para a necessidade de controle da exposição aos gases corrosivos para preservação da integridade dos materiais em ambientes agressivos.

Schoell *et al.* (2020) fizeram um estudo em campo, com ambiente controlado, sobre a formação das trincas por corrosão sob tensão induzida por cloro no aço inoxidável 304, foram realizadas análises microtomográficas em tempo real com raios-X de alta energia de um sincrotron. O estudo focalizou o aço inoxidável 304 em um ambiente corrosivo simulado com aplicação de sal nas trincas, submetendo as amostras a umidade e tração. As observações revelaram a evolução das trincas para ramificações, especialmente em direção à superfície, possivelmente devido a variações de estresse e corrosão na região. Análises adicionais identificaram a presença de cloro no material, formando compostos como CrCl₂, NiCl₂·6H₂O e FeCl₂. Contudo, o impacto exato desses compostos na formação das trincas por corrosão induzida por cloro ainda não está completamente compreendido. A análise também abrangeu uma investigação em uma amostra já com trincas, exposta a carga, em um ambiente marítimo corrosivo simulado. Os resultados destacaram uma ramificação significativa na superfície das

⁵ Um método de revestimento térmico em que um material em pó é fundido, acelerado e pulverizado em alta velocidade para criar uma camada protetora.

amostras, levando à necessidade de análises profundas de elementos finitos e intensidade de estresse para explicar esse fenômeno complexo.

O estudo de Wang *et al.* (2023) investigou o comportamento de corrosão e resistência à corrosão por pite do aço inoxidável martensítico 17-4 PH⁶ contendo inclusões de Al₂O₃ em um ambiente de cloro. Diversas técnicas eletroquímicas foram empregadas, incluindo espectroscopia de impedância eletroquímica, medições corrente-tempo, potenciostático e polarização potenciodinâmica, juntamente com testes de Mott-Schottky em soluções com diferentes concentrações de NaCl. Observou-se que a resistência à corrosão por pite diminuiu conforme a concentração de NaCl aumentou, sendo evidenciado um vínculo entre os potenciais de pite e a concentração de íons cloreto. Os pites se originaram em microfrestas próximas às inclusões de Al₂O₃, enquanto os filmes passivos se comportaram como camadas duplas tipo p e n com concentrações na faixa de 10²¹ - 10²² cm⁻³. A análise via espectroscopia de fotoelétrons de raios-X revelou mudanças na composição dos filmes passivos. O aumento do hidróxido e a diminuição do óxido devido ao aumento de NaCl contribuíram para a diminuição da resistência à corrosão por pite. Adicionalmente, houve indícios de que o aumento de CrO₃, a redução de água ligada e as alterações nas razões Cr e Fe também afetaram negativamente a estabilidade dos filmes passivos

O aço inoxidável multifásico é reconhecido por suas boas propriedades mecânicas, porém permanecem lacunas no entendimento de seus comportamentos de passividade e corrosão. Liu *et al.* (2024) investigaram os aspectos relacionados a corrosão em aço inoxidável multifásico utilizando diversas técnicas analíticas, como espectroscopia eletrônica Auger, espectroscopia de fotoelétrons de raios X, microscopia de força atômica e métodos eletroquímicos. As análises revelaram que o filme passivo desse aço é majoritariamente composto por óxidos de ferro e cromo, sendo mais rico em cromo na fase ferrítica e em níquel na martensítica. A espessura do filme varia entre as fases cristalinas, sendo mais fina na ferrítica no plano (001) e mais espessa na martensítica nesse mesmo plano, enquanto no plano (111) é mais espessa na martensítica e menos na austenítica. Houve uma relação exponencial entre o potencial de corrosão do aço inoxidável multifásico e a concentração de íons cloreto, ao passo que o potencial de proteção teve uma queda inicial seguida de estabilidade à medida que a concentração desses íons aumentava. A corrosão puntiforme tem início nas interfaces de fase, expandindo-se primariamente para a fase ferrítica, proporcionando importantes insights

⁶ 17% de cromo 4% de níquel que sofreu tratamento térmico para otimizar as propriedades mecânicas.

para a compreensão e possível prevenção dos processos de deterioração nesse tipo de material.

A tubulação de aço inoxidável não é recomendada para o transporte de cloro líquido devido à severa corrosão que pode ocorrer neste material quando em contato com o cloro. O cloro, especialmente em suas formas gasosa e líquida, é altamente reativo e pode causar danos significativos aos aços inoxidáveis. A incompatibilidade inclui a corrosão por cloro principalmente: i) por picada, ii) corrosão intersticial, e iii) corrosão sob tensão. Para conduzir cloro seco, o aço carbono é geralmente preferido devido à menor susceptibilidade à corrosão e aos custos mais baixos. No entanto, é essencial um controle rigoroso da umidade para evitar a formação de ácidos que corroem o aço carbono (Craig e Anderson, 2002).

O uso de aço inoxidável em tubulação para cloro seco não é recomendado devido à reatividade do cloro com componentes específicos do aço inoxidável. Isso pode levar à formação de cloretos corrosivos, que podem reagir com componentes do aço inoxidável, levando a fragilização à altas temperaturas, formação de fissuras e incompatibilidade geral. O aço carbono, por sua vez, é considerado mais adequado devido à sua resistência à corrosão por cloro seco, custo menor, e comportamentos específicos em relação à alternativas contra corrosão a outros agentes para certa temperatura de operação. Uma análise cuidadosa das condições operacionais é crucial ao escolher o material de tubulação adequado.

A corrosão do aço inoxidável pelo cloro seco envolve a interação do cloro com os componentes do aço inox, especialmente o cromo. O cloro reage com o cromo formando cloretos que comprometem a camada passiva de óxido de cromo. Em contraposição, o aço carbono é mais resistente à corrosão em ambientes de cloro seco devido à sua menor susceptibilidade aos processos de corrosão induzidos pelo cloro. A escolha do material ideal depende das condições operacionais e propriedades exigidas para garantir a vida útil do sistema de tubulação. O aço inoxidável depende da camada de óxido de cromo para resistir à corrosão, tornando-se vulnerável em ambientes agressivos, enquanto o aço carbono é menos suscetível e possui uma composição mais simples e econômica (Nickel Institute, 1997).

2.3.4. Normas de cloro e de corrosão

As normas de transporte de cloro líquido e as normas de ensaios de corrosão desempenham papéis essenciais garantindo a segurança, a eficácia e a integridade dos processos industriais que envolvem materiais corrosivos. Conforme cita fulano, os ensaios de corrosão são fundamentais para avaliar a resistência de materiais metálicos e não metálicos à

corrosão em ambientes contendo cloro e seus subprodutos, fornecendo dados importantes para a seleção de materiais em aplicações industriais.

Essas normas estabelecem procedimentos padronizados e métodos de ensaio que permitem a comparação consistente entre diferentes materiais e condições de operação. Os testes de corrosão podem incluir ensaios de imersão em meio corrosivo, exposição a névoa salina, testes acelerados de corrosão, entre outros, sendo essenciais para garantir a durabilidade e o desempenho dos materiais em ambientes hostis (Craig e Anderson, 2002).

No que diz respeito às normas de transporte de produtos perigosos e em especial, o cloro líquido, a segurança é um aspecto primordial. O cloro líquido é uma substância altamente corrosiva e tóxica, o que torna crucial o cumprimento rigoroso de regulamentos específicos para o seu transporte. Normas rígidas são estabelecidas para garantir que o transporte, armazenamento e manuseio do cloro líquido sejam realizados de forma segura e em conformidade com os requisitos legais e ambientais.

As normas de transporte de cloro líquido abrangem diversos aspectos, desde as condições de embalagem e rotulagem adequadas até os procedimentos operacionais durante o carregamento, descarregamento e transporte. Além disso, salientam a necessidade de treinamento adequado para os profissionais envolvidos na manipulação do cloro líquido, a inspeção regular dos equipamentos e a implementação de medidas de segurança ativas e passivas para prevenir acidentes e minimizar os riscos associados (Kreysa e Schütze, 2005).

As normas de ensaio de corrosão e as normas de transporte de cloro líquido são indispensáveis para garantir a segurança, a qualidade e a conformidade legal nas operações industriais que envolvem materiais corrosivos. O cumprimento dessas normas não apenas protege os trabalhadores e o meio ambiente, mas também assegura a eficiência e a confiabilidade dos processos industriais, contribuindo para um ambiente de trabalho seguro e sustentável.

Para avaliar a corrosão de um material, a abordagem mais apropriada ainda é a exposição desse material ao ambiente real de utilização. No entanto, devido à natureza geralmente demorada e dispendiosa dos testes em ambiente real, é essencial realizar simulações e acelerar esses testes. Assim, conforme previsto na ASM, volume 13 A e C (2003), os testes laboratoriais podem ser conduzidos em diversas condições e por várias razões, como mencionado anteriormente. Nesse contexto, uma pequena amostra é avaliada em laboratório para fornecer informações sobre a taxa de corrosão de componentes maiores utilizados na prática. Uma avaliação da taxa de corrosão é dada pela Equação 6.

$$Tc = \frac{\Delta M}{(S \cdot t \cdot \rho)} \quad (6)$$

Em que: Tc é a taxa de corrosão, dada em mm/ano; ΔM é a variação de massa do material, em g; S é a área de superfície exposta do material, em mm²; t é o tempo, dado em anos; ρ é a densidade, dada em g/mm³.

O *The Chlorine Institute* é uma organização internacional dedicada à segurança e ao manuseio seguro do cloro e produtos relacionados. Um dos recursos valiosos fornecidos pelo *The Chlorine Institute* são seus panfletos informativos, conhecidos como *Chlorine Institute Pamphlets* (Panfletos do Instituto do Cloro). Esses documentos são uma fonte essencial de orientação e melhores práticas para a indústria química e outras indústrias que lidam com o transporte, armazenamento e uso do cloro.

Os *Chlorine Institute Pamphlets* abrangem uma variedade de tópicos importantes, desde regulamentações de segurança até procedimentos operacionais padrão, emergências e respostas a incidentes. Eles contêm informações atualizadas sobre as propriedades do cloro, métodos seguros de manuseio e armazenamento, procedimentos de resposta a vazamentos, treinamento de funcionários e diretrizes de segurança para proteger trabalhadores, comunidades e o meio ambiente.

Esses panfletos são desenvolvidos por especialistas do setor e seguem as melhores práticas e padrões de segurança mais recentes. Eles são projetados para fornecer orientação clara e concisa, com instruções passo a passo para lidar com situações de emergência, minimizar riscos e garantir o cumprimento das regulamentações governamentais.

Além disso, os panfletos do *The Chlorine Institute* são uma ferramenta de referência valiosa para profissionais da indústria química, equipes de resposta a emergências, autoridades regulatórias e comunidades que possam ser afetadas por acidentes envolvendo cloro. Eles desempenham um papel fundamental na promoção da segurança, na prevenção de acidentes e na disseminação de boas práticas no manuseio do cloro. A Tabela 2.2 destaca os principais panfletos que abordam o cloro.

Tabela 2.2 – Principais normas de cloro do *The Chlorine Institute*.

Panfletos	Nome
Panfletos 01	Cloro Básico
Panfletos 05	Armazenamento de cloro líquido a granel
Panfletos 06	Sistemas de Tubulações para Cloro Seco
Panfletos 17	Guias operacionais e de segurança nas instalações de envasamento de cloro
Panfletos 49	Práticas recomendadas para o manuseio de cloro no seu transporte rodoviário à granel
Panfletos 57	Sistemas de fechamento de emergência para transferência a granel de cloro
Panfletos 60	Tubulações de cloro
Panfletos 64	Planos de atendimento às emergências em instalações de Cloro-álcalis, Hipoclorito de sódio e cloreto de hidrogênio
Panfletos 65	Equipamentos de proteção individual para produtos químicos de plantas cloro-álcalis
Panfletos 73	Equipamentos de monitoramento atmosférico para cloro granel
Panfletos 91	Lista de verificação para instalações de envasamento de cloro, distribuição de cloro e usuários de tanques ferroviários de cloro
Panfletos 155	Manual do cloro para responsáveis por estações de tratamento de água e águas residuais

Fonte: Adaptado de *The Chlorine Institute* (2020) e *The Chlorine Institute* (2023).

Conforme a Tabela 2.2, destaca-se o Panfleto 6, que tem como objetivo fornecer informações úteis sobre sistemas de tubulação de cloro, oferecendo orientações práticas na seleção do material adequado para cada aplicação específica. O panfleto também ressalta que, em locais específicos de consumo ou produção, pode ser vantajoso, do ponto de vista técnico, utilizar materiais diferentes dos recomendados. Para orientações na elaboração de projetos de sistemas de tubulação subterrânea destinados ao transporte de cloro, o Panfleto 60 apresenta informações adicionais e serve como uma fonte útil para os projetistas.

A corrosão é um problema comum quando se trata de metais conduzindo algum produto químico. Conforme cita Sabará (2022), em especial, o cloro quando em contato com umidade se torna altamente corrosivo a grande maioria dos metais. Conforme cita Ferreira (2015), os ensaios de corrosão podem ser feitos em campo, em serviço e/ou em laboratório, e cada um deles ajuda a determinar algumas características específicas do material ensaiado. O ensaio em laboratório é feito em condições controladas, com amostras bem definidas e um tanque com o meio de corrosão, sendo a principal avaliação feita a perda de massa do material

ensaiado. Já para o ensaio em serviço, geralmente não é possível controlar as condições de ensaio, e também pode requer um longo período de teste para se atingir os objetivos definidos, mas é melhor para estimar a durabilidade do material em condições reais.

As normas de corrosão desempenham um papel crucial na indústria, garantindo a segurança, eficácia e longevidade de estruturas e equipamentos expostos a ambientes corrosivos. A padronização de procedimentos e critérios para avaliar a resistência à corrosão dos materiais é essencial para a seleção adequada de ligas metálicas em aplicações críticas. Além disso, o cumprimento dessas normas permite a prevenção de falhas prematuras, redução de custos operacionais e melhoria da sustentabilidade ambiental.

Entre as normas mais reconhecidas e utilizadas para ensaios de corrosão em aços, destacam-se a seguinte:

ASTM G48 (2020): Esta norma estabelece diretrizes para a realização de ensaios de perda de peso de aços inoxidáveis em diversos meios corrosivos, visando avaliar sua resistência à corrosão. Por meio de testes padronizados, é possível determinar a adequação e durabilidade dos aços em ambientes corrosivos específicos.

ISO 9227 (2022): Norma que aborda os ensaios de corrosão acelerada em aços carbono e de baixa liga, proporcionando orientações para a avaliação da resistência à corrosão desses materiais em diferentes condições ambientais. Esses ensaios são fundamentais para prever a vida útil dos aços e otimizar sua seleção em ambientes agressivos.

No contexto específico do cloro, o qual é um agente altamente corrosivo, normas como a NACE (*National Association of Corrosion Engineers*) TM0170 ⁷ (2013) (anteriormente conhecida como TM0107) estabelecem diretrizes e procedimentos para a realização de testes e monitoramento da corrosão em ambientes contendo cloro. Essas normas visam garantir a segurança e integridade de equipamentos e estruturas em operações que envolvem o manuseio e o transporte de cloro, evitando falhas catastróficas e danos à infraestrutura.

Portanto, a conformidade com normas de corrosão é essencial para garantir a durabilidade e o desempenho dos tubos metálicos em condições corrosivas. A utilização dessas normas estabelecidas favorece a qualidade dos produtos, a segurança dos processos industriais e a proteção do meio ambiente, contribuindo para o desenvolvimento sustentável da indústria e promovendo a eficiência e a confiabilidade nas operações e manutenções do sistema de cloro.

⁷ TM - *Test Method* – Método de teste.

2.4. Ensaios Mecânicos e Microestrutura

Os ensaios mecânicos desempenham um papel fundamental na avaliação e garantia da integridade estrutural das tubulações utilizadas em diversos setores industriais, como petróleo e gás, químico, alimentos, entre outros. Por meio desses ensaios, são realizadas análises das propriedades mecânicas dos materiais das tubulações, como resistência, flexibilidade, tenacidade, entre outras, a fim de assegurar a segurança e durabilidade dos sistemas de tubulação (Smith, 2005).

Um dos ensaios mais comuns em tubulações é o ensaio de pressão hidrostática, que avalia a capacidade das tubulações de suportar a pressão interna dos fluidos transportados, verificando sua estanqueidade e resistência a vazamentos. Além disso, o ensaio de tração é utilizado para determinar a resistência à ruptura das tubulações quando submetidas a forças de tração, sendo crucial para a seleção correta dos materiais utilizados nos sistemas de tubulação (Mohitpour *et al.*, 2000).

Outro ensaio relevante é o ensaio de dobramento, que avalia a capacidade das tubulações de suportar cargas de flexão, sendo essencial para verificar a integridade estrutural e a resistência à fadiga das tubulações instaladas em ambientes dinâmicos. Além disso, o ensaio de dureza é empregado para avaliar a resistência dos materiais das tubulações a diversas formas de desgaste e abrasão, fatores importantes para a manutenção da eficiência dos sistemas (Smith, 2005).

É fundamental ressaltar que a realização de ensaios mecânicos em tubulações contribui para a identificação precoce de possíveis falhas estruturais ou problemas de segurança, permitindo a tomada de medidas preventivas e corretivas adequadas para garantir o pleno funcionamento dos sistemas de tubulação. A padronização dos ensaios mecânicos por meio de normas e regulamentações específicas é essencial para assegurar a confiabilidade e conformidade dos materiais utilizados, bem como a segurança dos operadores e do meio ambiente (Mohitpour *et al.*, 2000).

Os ensaios mecânicos desempenham um papel crucial na avaliação da integridade estrutural e desempenho das tubulações, contribuindo para a segurança, eficiência e confiabilidade dos sistemas de transporte de fluidos em diversos setores industriais. A implementação sistemática desses ensaios e a normatização existente é essencial para garantir a qualidade e durabilidade das tubulações, proporcionando um ambiente operacional seguro e eficiente (Mohitpour *et al.*, 2000).

As tubulações utilizadas para transporte do cloro, além de outros requisitos dimensionais, devem resistir a pressão de projeto do sistema, incluindo fator de segurança, e

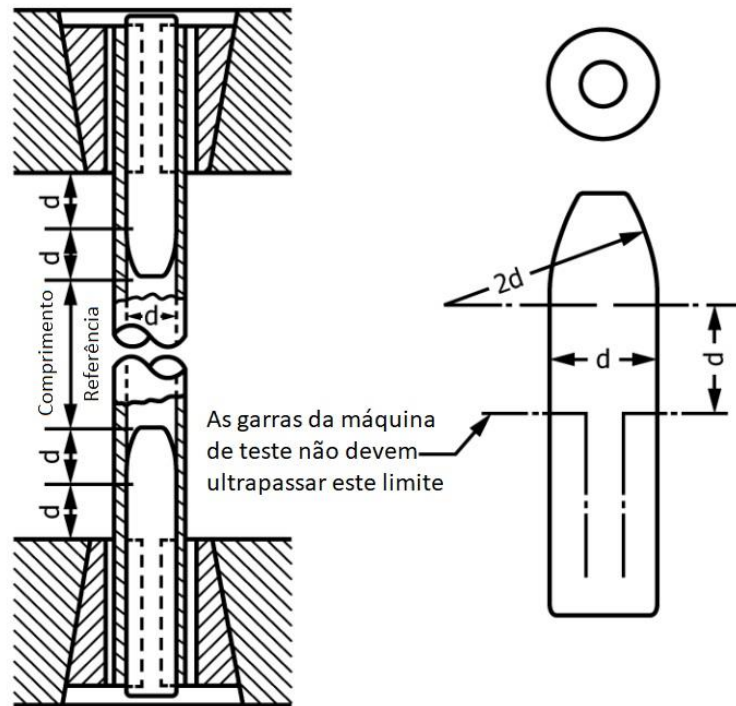
serem inertes ao cloro, em termos de corrosão. *The Chlorine Institute* (2020), em seu panfleto 6, estabelece os requisitos para sistemas de tubulações de cloro seco, e para sistemas de cloro líquido, é definido uma classe de pressão de 2068 kPa. Em termos de ensaios, para o teste hidrostático dos tubos, a norma recomenda um teste com no mínimo 1,5 vezes a pressão de projeto. Já a norma ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR (Norma Brasileira Registrada) 5590 (2017), recomenda um teste hidrostático conforme diâmetro nominal e espessura da parede. Além do teste hidrostático, pode ser feito o ensaio de tração e dobramento, além de ensaio não destrutivo como uma alternativa ao ensaio hidrostático. O processo de fabricação dos tubos deve atender aos requisitos mínimos de normas vigentes.

A norma ASTM A370 (2024) é um padrão amplamente reconhecido e utilizado na indústria para ensaios mecânicos de materiais metálicos. O documento fornece diretrizes e procedimentos para a realização de testes de tração, dureza, flexão e impacto em diversos tipos de metais e ligas, visando avaliar suas propriedades mecânicas e garantir sua conformidade com os requisitos de projeto e especificações técnicas.

A ASTM A370 (2024) estabelece os métodos de ensaio específicos a serem empregados para a determinação de parâmetros essenciais, relacionados ao comportamento mecânico dos corpos de prova testados. Essas informações são vitais para a caracterização dos materiais, auxiliando na seleção adequada de ligas metálicas, no projeto de componentes estruturais e no controle de qualidade dos produtos fabricados.

De maneira específica, a norma ASTM A370-24 (2024), que corresponde à revisão feita em 2024, é um documento padrão que estabelece os requisitos para a realização de ensaios mecânicos em materiais metálicos, especialmente em tubos metálicos, conforme definido pela ASTM International. Esta norma aborda procedimentos de ensaios para determinar propriedades mecânicas cruciais de tubulações fabricadas, como resistência à tração, limite de escoamento, alongamento, dureza, entre outros parâmetros essenciais. A norma fornece orientações precisas sobre como realizar os testes e interpretar os resultados, garantindo a consistência e a confiabilidade dos procedimentos adotados na avaliação das propriedades dos metais. Para o ensaio de tração em tubulação, a norma no seu item A2.2.1 estabelece as condições para ensaio em um tubo inteiro, sem a necessidade de efetuar a extração de uma amostra. A Figura 2.7 mostra os detalhes do ensaio.

Figura 2.7 – Detalhes das distâncias mínimas para ensaio e do plugue.



Fonte: Adaptado de ASTM A370-24 (2024).

Pela Figura 2.7, é possível observar o tubo fixado nas garras da máquina de ensaio, e um plugue adicional deve ser usinado com o objetivo de ser introduzido no tubo a ser ensaiado e evitar que a garra da máquina deforme o tubo devido ao seu furo interno. A amostra deve possuir um comprimento de referência efetivo (*Gage Length*) de 50 mm, e a garra da máquina não deve ultrapassar o limite de duas vezes o diâmetro interno do tubo testado.

Dessa forma, a norma ASTM A370-24 (2024) desempenha um papel importante na padronização e na garantia da qualidade dos materiais metálicos, contribuindo para a segurança, confiabilidade e eficiência dos tubos fabricados por métodos alternativos de fabricação. Sua aplicação correta e a conformidade com os requisitos dessa norma são fundamentais para assegurar a adequação e o desempenho dos materiais utilizados em uma variedade de aplicações, sustentando a integridade e a excelência dos produtos fabricados e dos projetos desenvolvidos na indústria.

As normas específicas de ensaio de dureza, como a ASTM E10 para o ensaio Brinell e a ASTM E18 para o ensaio Rockwell, são fundamentais para garantir a uniformidade e a precisão nas medições de dureza de materiais. O ensaio Brinell envolve a aplicação de uma carga constante sobre uma esfera de aço ou de carbeto de tungstênio, e a medição do diâmetro da impressão deixada na superfície do material, sendo especialmente adequado para materiais

metálicos mais grossos e heterogêneos. A ASTM E10 (2018) e a ISO 6506 (2014) regulamentam esse processo, definindo a carga aplicada, o tempo de aplicação e os métodos de medição.

O ensaio de dureza Brinell é especialmente relevante para medir a dureza de materiais metálicos com superfícies mais grossas e heterogêneas. O método envolve a aplicação de uma carga constante sobre uma esfera de aço ou de carboneto de tungstênio contra a superfície do material testado. A carga é mantida por um período definido, e o diâmetro da impressão deixada pela esfera é medido para calcular a dureza do material. Normas como a ASTM E10 e a ISO 6506 regulamentam os procedimentos do ensaio Brinell, garantindo consistência nos resultados. De acordo com a ASTM E10-18 (2018), por exemplo, a carga aplicada (que pode variar de 500 kgf a 3000 kgf) e o diâmetro da esfera devem ser selecionados conforme o tipo de material testado. A norma também especifica parâmetros de tempo de aplicação da carga e metodologias para a medição do diâmetro da impressão, utilizando micrômetros ou equipamentos ópticos precisos, como microscópios

As normas de ensaio de rugosidade, especialmente a ABNT NBR ISO 4287 (2002) e 4288 (2008) e a ISO 21920 (2021) (substitui a ISO 4287:1997), são fundamentais para garantir a uniformidade e precisão na avaliação da textura superficial dos materiais, sendo utilizado como fator de qualidade superficial de acabamento dos tubos produzidos. A ABNT NBR ISO 4287 (2002) e a 4288 (2008) definem parâmetros primários de rugosidade, como a rugosidade média aritmética (Ra), a altura máxima do perfil (Rz) e a rugosidade quadrática média (Rq), e especifica metodologias detalhadas para medir e interpretar esses parâmetros, assegurando avaliações consistentes e comparáveis. A correta aplicação desta norma é essencial para garantir a qualidade dos produtos e a confiabilidade dos processos de fabricação, influenciando diretamente fatores como atrito, desgaste e aderência de revestimentos.

A ASTM E407-07 (2015) é uma norma técnica que estabelece métodos padronizados para a preparação de metalografias e análise de microestruturas de materiais metálicos. A norma abrange procedimentos detalhados para a preparação de amostras metálicas para análise microscópica, incluindo cortes, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico.

Aqui estão alguns pontos chave da norma ASTM E407-07:

- Corte: A preparação começa com o corte da amostra de modo a preservar a microestrutura e evitar aquecimento excessivo, que pode causar alterações indesejadas nos metais analisados.

- **Embutimento:** Embutir a amostra é necessário para manuseio conveniente durante as fases subsequentes de preparação. O embutimento pode ser feito com resinas de baixa temperatura ou usando pressão e calor.
- **Lixamento:** O lixamento progressivo usando lixas de diferentes granulações remove irregularidades e proporciona uma superfície plana e lisa que é essencial para as fases seguintes do processo.
- **Polimento:** Esta etapa visa obter uma superfície altamente polida para análise microscópica da microestrutura do material. Polimentos mecânicos e eletrolíticos são métodos comumente utilizados.
- **Ataque Químico (Aplicação de Reagentes):** A norma descreve uma série de reagentes químicos usados para atacar superficialmente a amostra, revelando as microestruturas para análise. O tipo específico de reagente depende do material e da microestrutura de interesse.
- **Análise Microestrutural:** Com uma amostra corretamente preparada, técnicas de microscopia óptica e eletrônica são empregadas para estudar a microestrutura do material, proporcionando informações críticas sobre propriedades mecânicas, falhas e desempenho em serviço.

A norma ASTM E407-07 (2015) também estabelece o uso dos reagentes conforme o material a ser atacado e o objetivo da análise microestrutural. Em especial, a solução nital, denominada reagente 74 na norma, é uma mistura de ácido nítrico e álcool etílico utilizada na metalurgia para revelar a microestrutura de ligas metálicas, como o aço, através de ataque químico controlado. Empregada em ensaios metalográficos, ela permite a análise microscópica das amostras para avaliar propriedades estruturais, como granulação, inclusões e fases.

A solução nital, conforme especifica a norma ASTM E407-07 (2015), ataca seletivamente a superfície do metal, revelando claramente as microestruturas, e a eficácia do ataque varia com a composição do material, o tempo de imersão e a concentração da solução. Quando a porcentagem de ácido nítrico (HNO_3) na solução nital aumenta, a solução ataca a superfície do metal mais rapidamente (aumenta a taxa de condicionamento). No entanto, essa agressividade reduz a capacidade da solução de distinguir detalhes finos e sutis na microestrutura do material (diminuição da sensibilidade). Conforme já mencionado nos trabalhos referenciados, a solução nital é comumente utilizada para observações microestruturais de elementos fabricados pela MADA com arames de baixo carbono de alta qualidade, como o ER70S6.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O processo metodológico para a fabricação e avaliação dos tubos fabricados seguiram os seguintes passos: i) Definição dos locais a serem realizados a fabricação e ensaios dos tubos; ii) Definição dos parâmetros de soldagem para otimização de fabricação da peça; iii) Processamento da peça fabricada; iv) Ensaios necessários da peça fabricada e de outros corpos de prova. A validação da fabricação é um fator de extrema importância para a confiabilidade da peça fabricada, sendo necessário o acompanhamento rigoroso deste passo da metodologia.

3.1. Apresentação do problema e estrutura de fabricação

A empresa de saneamento sob análise está situada em Goiás, cidade de Goiânia e é uma sociedade mista. Atualmente, ela é a maior do estado, operando em 225 cidades goianas para produzir água tratada e coleta de esgoto. O foco da avaliação recai sobre sistema de cloração da Estação de Tratamento de Água Mauro Borges (ETA-MB), localizada na rua BG 18, Residencial Bela Goiânia, Goiânia-GO. A corporação está comprometida com o desenvolvimento contínuo do seu sistema de manutenção e operação; entretanto, melhorias são necessárias diante das falhas encontradas na gestão dos dados relativos à manutenção.

O foco do estudo será na divisão de manutenção de campo da empresa. Dentro da estrutura organizacional local, esta divisão está diretamente ligada ao departamento de produção da empresa. O principal produto da empresa é o tratamento de água e esgoto. A Figura 3.1 mostra esta casa de máquinas da estação elevatória de água bruta.

Figura 3.1 - Casa de máquinas responsável pelo bombeamento de água bruta.

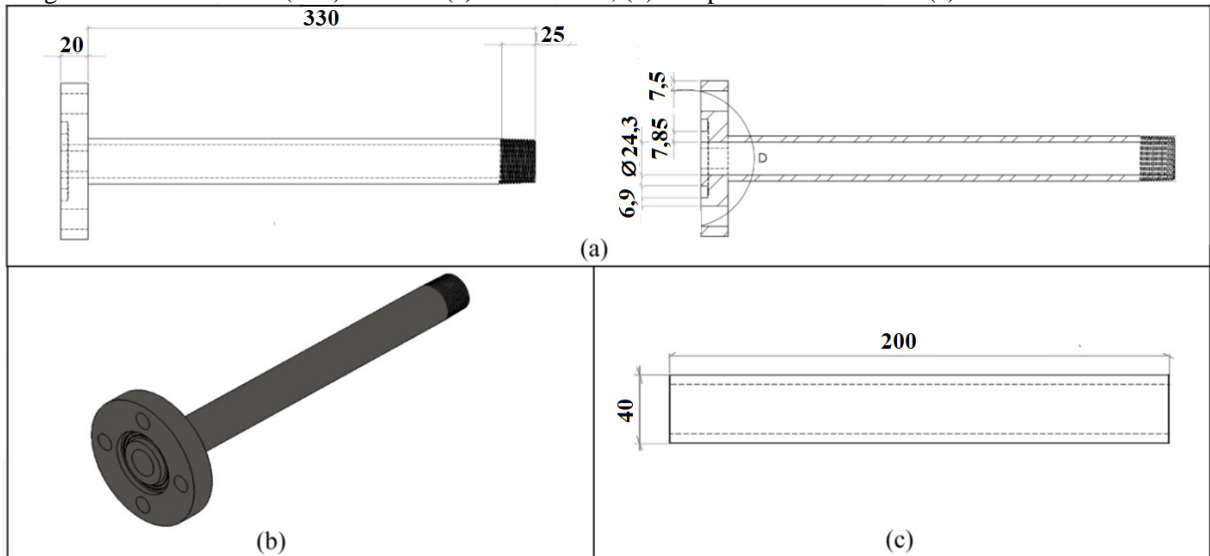


Fonte: Autor (2023).

Na Figura 3.1 é possível observar três conjuntos motor bomba abaixo e dois conjuntos de turbina bomba acima. Os motores têm tensão nominal de 4,16 kV, potência de 2000 kW, corrente de 350 A e rotação de 890 RPM e são acionados por inversor de frequência. Acima na Figura 3.1, a casa de máquinas ainda possui duas turbinas, sendo uma responsável por geração de energia e a outra para acionar uma bomba. Esses equipamentos são responsáveis por bombear a água bruta para a estação de tratamento de água, onde, entre outros processos, ocorrem a oxidação e a desinfecção da água bruta por cloro.

Para fabricação da peça tubular com flange, foram utilizadas principalmente as estruturas de equipamentos existente no Prédio de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás, no Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF), campus Goiânia. A peça a ser fabricada é um tubo de aço carbono aplicado no transporte de cloro líquido no sistema de desinfecção e oxidação da Estação de Tratamento de Água Mauro Borges. A Figura 3.2 ilustra as principais dimensões, em milímetros, do tubo a ser fabricado, sem as tolerâncias.

Figura 3.2 – Dimensões (mm) do tubo: (a) Vista lateral, (b) Perspectiva isométrica e (c) amostra normalizada.



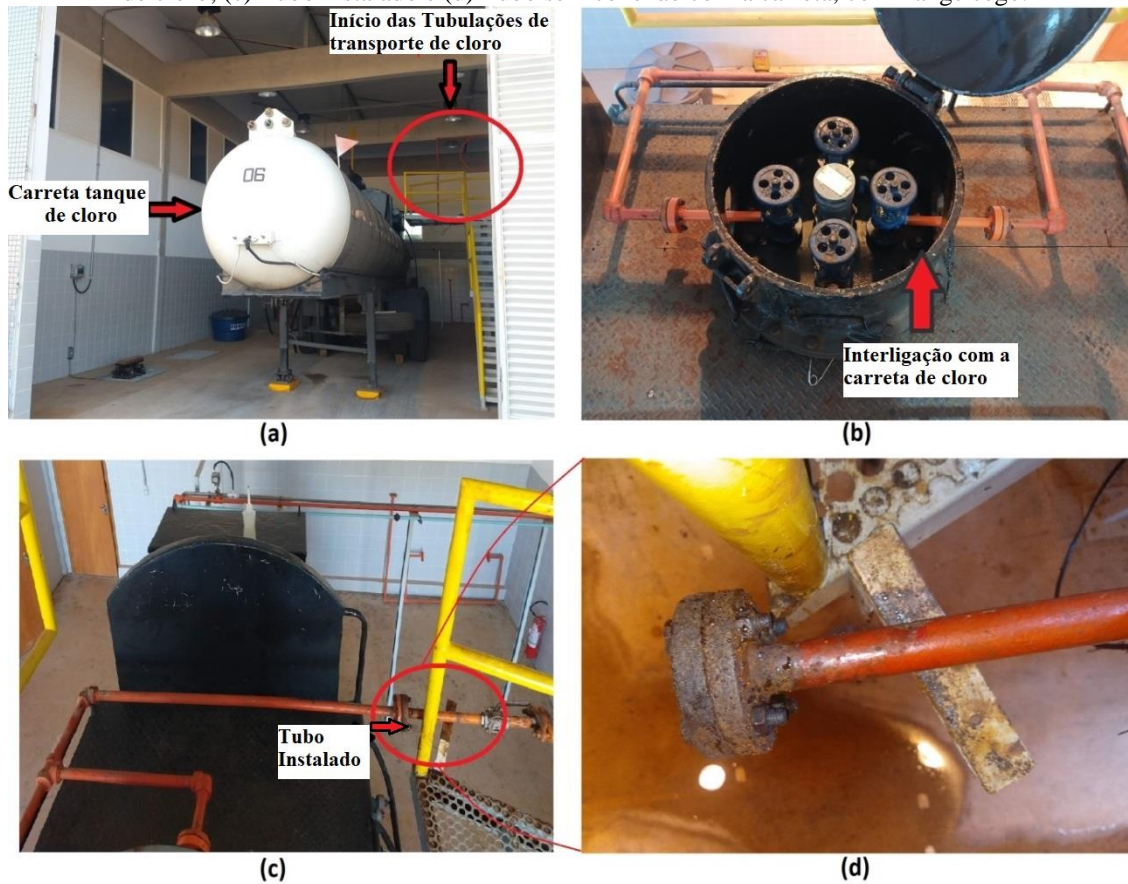
Fonte: Autor (2023).

s

Pela Figura 3.2 é possível observar detalhes de fabricação do tubo, e também as dimensões que devem ser desenvolvidas durante cada camada do processo MADA-MIG. A Figura 3.2 (c) ainda mostra um tubo normalizado, que foi utilizado para testes de parâmetros de usinagem e ensaios mecânicos.

O tubo, no local aplicado, possui um desgaste prematuro, sofrendo com ataque de corrosão pelos subprodutos do cloro. O material do tubo atual é o ASTM A106 grau B e flanges com classe de pressão 300. Este tubo faz parte da conexão entre a carreta tanque de cloro, de 19000 kg, e as tubulações que conduzem o cloro líquido para os evaporadores de cloro. A Figura 3.3 mostra o local de instalação do tubo de transporte de cloro.

Figura 3.3 – Edifício de cloro: (a) Carreta tanque de cloro; (b) Interligação da carreta com o sistema de dosagem de cloro; (c) Tubo instalado e (d) Tubo sem conexão com a carreta, com flange cego.



Fonte: Autor (2024).

Conforme a Figura 3.3 (d) é possível notar a forte corrosão que ataca não só o tubo, mas todas as estruturas metálicas próximas ao local. O sistema de tubulações que é conectado à carreta de cloro é interligado com o evaporador de cloro Siemens, modelo 50-200 Evaporador, responsável por evaporar o cloro líquido. A Figura 3.4 destaca o evaporador e o sistema de tubulações que interliga com a carreta de cloro.

Figura 3.4 – Evaporadores de cloro e tubulações acessório.

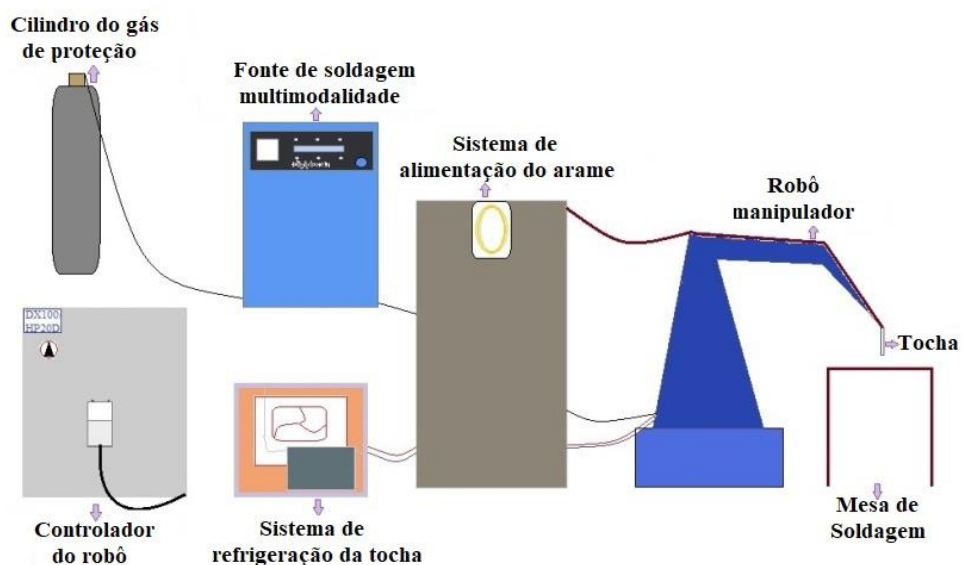


Fonte: Autor (2024).

Pela Figura 3.4, é possível observar todo o sistema de tubulações e acessórios do sistema de cloro na região do evaporador de cloro. Após passar pelo evaporador, o cloro, já no estado gás, é conduzido para o clorador, que é responsável pela dosagem de cloro no sistema.

Com relação a estrutura para fabricação do tubo pela MADA, que foi realizada no Laboratórios de Materiais e Processos de Fabricação da UFG, a Figura 3.5 ilustra o esquema básico que será utilizada.

Figura 3.5 – Esquema para fabricação da peça por MADA.



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 3.5 é possível visualizar: i) o manipulador robótico Motoman HP20 equipado com a tocha de soldagem, ii) sistema de: a) alimentação de arame e b) refrigeração da tocha de soldagem, iii) fonte de soldagem multiprocesso Digiplus A7, modo MIG convencional, iv) controlador DX 100, v) Cilindro do gás de proteção, Ar + CO2.

3.2. Definição dos parâmetros de deposição

Foi realizada a fabricação preliminar da peça com intuito de otimizar os parâmetros do processo para a fabricação da peça. Foram analisados: i) os parâmetros do processo MIG/MAG, para obtenção de melhor estabilidade e dissipação de calor da soldagem e ii) a geometria de fabricação, para obtenção de uma peça com formato e dimensões adequadas.

A geometria do flange foi desenhada no *software* Inventor, e exportada para o *software* RoboDK para fabricação da peça com o manipulador robótico Motoman HP20 e controlador DX 100. A Figura 3.6 mostra o robô manipulador Motoman, que possui capacidade de carga de 20 Kg e manipulador multiprocessos, 6 eixos. O controlador DX100 possui opção para alimentação elétrica trifásica, em tensões que variam de 220V até 440V, além de entradas e saídas de dados e relês. A Figura 3.7 mostra a fonte de soldagem multiprocessos Digiplus e o controlador do robô manipulador.

Figura 3.6 – Robô manipulador utilizado na fabricação.



Fonte: Autor (2024).

Figura 3.7 – Apresentação da fonte de soldagem e controlador do robô.



Fonte: Autor (2024).

Para efetuar a fabricação, foram desenhados, no *software* Inventor, círculos de diferentes diâmetros e com espaçamento fixo entre cada círculo com objetivo de obter um flange com furo central de 20 mm e diâmetro total de 115 mm. Este espaçamento fixo foi variado nos valores de 6 mm, 9 mm e 12 mm, com objetivo de obter uma face retilínea do flange, com o mínimo valor possível de ondulações e poucos desvios. O arame utilizado para fazer a fabricação das peças foi o AWS A5.18 ER70s6 de 1,2 mm de diâmetro. A Tabela 3.1 e Tabela 3.2 destacam a composição química e propriedades mecânicas do arame, respectivamente, e a Figura 3.8 apresenta o arame utilizado na deposição.

Tabela 3.1 - Composição do arame ER70S-6.

Classe	Tipo	Elemento	C	Si	Mn	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo	V
AWS 5.15	ER70S- 6	% Mín.	0,06	0,80	1,40	-	-	-	-	-	-	-
		% Max.	0,15	1,15	1,85	0,035	0,025	0,5	0,15	0,15	0,15	0,03

Fonte: SUMIG (2019).

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas do arame ER70S-6.

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

Fonte: SUMIG (2019).

Figura 3.8 – Arame utilizado na fabricação das peças.



Fonte: Autor (2023).

A tensão de referência foi fixada em 19V e a taxa de crescimento (ks)⁸ e diminuição (kd)⁹ da corrente de soldagem na fonte foram fixados em 60. A velocidade de alimentação do arame foi variada entre 3 m/min e 3,5 m/min, com incrementos de 0,1 m/min. A distância do bico de contato à peça (DBCP) foi variada entre 12 mm a 16 mm, com incremento de 1 mm e excluindo a DBCP de 13 mm, e a vazão do gás de proteção, variada entre 20 l/min e 31 l/min, com incremento de 3 l/min. Os valores otimizados estão na faixa próxima àqueles recomendados por Scotti e Ponomarev (2014) para soldagem MIG e os valores utilizados por Goviazin *et al.* (2022) para fabricação por MADA com arame ER70s6. O critério de otimização foi o acabamento da peça fabricada e a ausência de defeitos superficiais como porosidades. A Tabela 3.3 resume os parâmetros fixados e variados.

Tabela 3.3 – Parâmetros para otimização da fabricação por MADA.

Espaçamento entre círculos (mm)	Tensão de referência (V)	ks e kd ¹⁰	Velocidade de alimentação (m/min)	DBCP (mm)	Vazão do gás de proteção (l/min)
6, 9 e 12	19 V	60	3 – 3,5	12 - 16	20 - 31

Fonte: Autor (2023).

⁸ Ajuste da dinâmica de subida, que atua primordialmente durante a transferência da gota.

⁹ Ajuste da dinâmica de descida, que atua primordialmente durante a formação da gota (período de arco).

¹⁰ Quando maior o valor de ks e kd menores são as respectivas indutâncias.

O incremento da velocidade de alimentação foi de 0,1 m/min, para a DBCP, foram testados os valores de 12mm, 14mm, 15mm e 16mm e a vazão do gás de proteção foram testados a vazão de 20 l/min, 24 l/min, 27 l/min e 31 l/min, conforme apresentado na Tabela 3.3. O modo de transferência metálica utilizado no processo de fabricação foi o curto-circuito. A transferência por curto-circuito na soldagem MIG com MADA pode ser justificada por várias razões, conforme citam Pattanayak e Sahoo (2021) e Zhao *et al.* (2023). Destaca-se a economia de gás, baixa energia térmica, soldagem em posições variadas, controle satisfatório da solda, menor inclusão de gás e versatilidade na deposição. Essa escolha proporciona estabilidade, baixa formação de respingos e controle adequado do cordão de deposição, tornando-a uma opção equilibrada em termos de custo, qualidade e adaptabilidade a várias condições de fabricação.

Após a deposição de cada camada na fabricação, foi aguardado um período de 90 segundos para o resfriamento adequado, a fim de evitar escorrimientos e melhorar a qualidade da próxima camada depositada. A cada camada depositada, foi realizada uma inspeção visual para identificar eventuais defeitos e avaliar a qualidade geral da deposição. O tubo fabricado pelo processo de MADA recebeu o *tag* de “tubo MADA”. Posteriormente, a peça passou por processos de usinagem para atingir as dimensões finais desejadas. Para avaliar as propriedades mecânicas e a composição microestrutural das amostras, uma série de ensaios e análises foram realizadas.

3.3. Processamento pós fabricação

O componente fabricado pela MADA estava inacabado, necessitando de modificações para atingir as dimensões finais desejadas. Para isso, técnicas de usinagem foram empregadas. A peça foi separada da chapa de base por meio de corte com lixadeira. Em seguida, a peça foi encaminhada para o torno, onde ocorre a usinagem para atingir as dimensões finais, conforme Figura 3.2 (a) e (b).

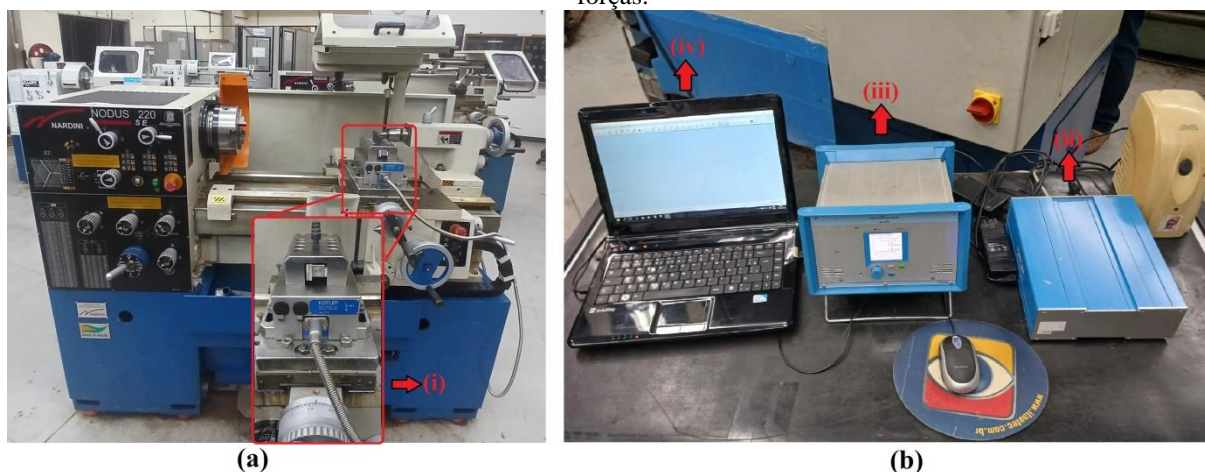
Como a usinagem é uma parte integrante do processo pós-fabricação das peças, é essencial medir as forças de usinagem, assegurando a qualidade e a eficiência do processo de fabricação. Ela influencia diretamente a precisão dimensional e o acabamento superficial dos tubos, ajuda a entender o desgaste das ferramentas, que pode ser associado a picos e dispersão do gráfico da força de usinagem, otimiza os parâmetros de corte, reduz o consumo de energia e detecta possíveis anomalias no processo. Altos valores de dureza e conseqüentemente de força de usinagem no material podem levar ao desgaste prematuro da ferramenta. Além disso, é crucial para garantir a segurança do operador e a integridade das máquinas, evitando falhas

catastróficas e contribuindo para a eficiência e a sustentabilidade do processo, além de reduzir custos operacionais.

Para avaliar a força do processo de usinagem, foi produzida uma amostra tubular por MADA [ver Figura 3.2 (c)]. Essa amostra consistia em uma peça tubular confeccionada com o arame AWS A5.18 ER70s6, e dimensões normalizadas de 44 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento. As verificações de usinagem foram realizadas no Núcleo de Pesquisa em Fabricação – NUPEF do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG, campus Goiânia.

Para comparar as características de usinagem, foi utilizado um segundo tubo, de aço SAE 1020 comercial laminado sem costura ¹¹, totalizando duas peças a serem usinadas no torno: i) tubo comercial e ii) tubo MADA. As peças foram uniformizadas, conforme Figura 3.2 (c), para o diâmetro externo de 40 mm. A usinagem foi apenas na superfície externa, torneada, não sendo feita usinagem nos furos dos tubos. Os parâmetros de usinagem avaliados foram as forças relacionadas ao processo de usinagem. A Figura 3.9 mostra o torno e os equipamentos para medição das forças de usinagem.

Figura 3.9 – Equipamentos: (a) dinamômetro no torno convencional e (b) sistema de aquisição dos sinais de forças.



Fonte: Autor (2024).

A máquina-ferramenta, conforme visto na Figura 3.9 (a), é um torno paralelo universal, fabricado pela Nardini, modelo NODUS 220 SE. O sistema experimental para medição da força de usinagem, exibido na Figura 3.9 (a) e (b), é composto por: i) um dinamômetro triaxial piezelétrico, fabricado pela Kistler, tipo 9265B, montado no torno, ii) um sistema de aquisição de dados, da Kistler, com *software* DynoWare, iii) um amplificador

¹¹ Sem processo de soldagem em sua fabricação.

de carga multicanal, da Kistler, tipo 5070 e iv) um computador portátil, sistema operacional Windows 10, com o *software* Scilab versão 5.5.2 e o LibreOffice: Calc.

A ferramenta de corte foi o inserto de metal duro (carbeto de tungstênio - WC) Brassinter, modelo CNMG 120404-MC7015, composto por carbonitreto de titânio (TiCN) e óxido de alumínio de grão fino (Al_2O_3), montado no suporte de torneamento SVJCR 2020 K16. Não foi utilizado fluido de corte durante os ensaios de usinagem. A Figura 3.10 mostra o suporte montado.

Figura 3.10 – Conjunto ferramenta utilizado na usinagem de acabamento dos tubos.



Fonte: Autor (2024).

A rotação da peça no torneamento, RPM do torno, foi definida para velocidade de corte constante (V_c), bem como a profundidade de corte (a_p). O avanço (f) foi variado em dois níveis para faixas recomendadas para "avanço de acabamento". Foram realizados três repetições para cada ensaio. O comprimento total usinado de cada ensaio foi de 10 mm. Ao todo, o procedimento experimental resultou em 18 medições de componentes de forças, sendo analisadas individualmente para o período ativo de corte. Os valores de avanço para acabamento são recomendados por diversas referências, como em Machado *et al.* (2015). A Tabela 3.4 mostra os valores dos parâmetros de usinagem.

Tabela 3.4 – Parâmetros de usinagem fixados e variados.

RPM / Velocidade de corte (m/min)	Profundidade de corte (mm)	Avanço (mm/rot)
950 / 119,38	1	0,05
		0,15

Fonte: Autor (2023).

Em termos de aquisição de dados, o esquema montado executou as seguintes etapas: i) montagem do sistema de usinagem e definição dos parâmetros no torno; ii) execução da

usinagem e aquisição de dados brutos de força pelo dinamômetro; iii) amplificação dos sinais pelo amplificador de carga com frequência de 1 kHz; iv) tratamento dos dados pelo software DynoWare para possibilitar a leitura no computador; v) envio dos dados tratados para o computador e leitura no *software* Scilab; vi) processamento dos dados de força por um script no Scilab; vii) geração de planilha no formato CSV, que pode ser analisada no *software* LibreOffice: Calc.

O gráfico obtido é em estado bruto, com regiões de início e fim de usinagem que não são relevantes para a análise de força de usinagem. A região de interesse do gráfico (onde realmente ocorre a usinagem do material) é extraída e um novo gráfico de força é obtido, contudo, apenas para a região de interesse. Esta função é realizada pelo script da etapa "vi". O arquivo CSV gerado possui diversas medições das componentes de força (F_c , F_p e F_f). Esses dados relacionados às componentes de força de usinagem, obtidos no *software* Scilab, foram tratados utilizando o valor eficaz (RMS - *Root Mean Square*) para calcular a força de usinagem RMS. Em termos estatísticos, foi realizada a análise de variância (ANOVA) dos dados obtidos com 95% de confiança.

3.4. Ensaios mecânicos, Microestrutura e Corrosão

A condução de cloro por tubos de aço impõe desafios significativos devido à natureza altamente corrosiva associada aos subprodutos deste elemento químico. Para mitigar os riscos e garantir a eficiência dos sistemas de transporte de cloro, é imprescindível realizar uma série de ensaios mecânicos e de corrosão nos tubos de aço. Esses testes são necessários para avaliar a resistência e durabilidade do material em condições adversas.

O ensaio de dureza, por exemplo, permite medir a capacidade do aço de resistir à deformação permanente, revelando sua adequação para resistir ao desgaste. A análise da rugosidade da superfície do tubo fornece a percepção dos níveis de acabamento superficial do tubo fabricado e também sobre a interação entre o material e o cloro, influenciando diretamente sua resistência à corrosão.

O ensaio hidrostático testou a capacidade do tubo de suportar pressões internas elevadas, simulando as condições operacionais e normativas, assegurando a integridade estrutural do sistema. Paralelamente, o ensaio de tração avaliou as propriedades mecânicas fundamentais do aço, como sua resistência e alongamento, importantes para determinar a performance do tubo sob estresse. A análise da microestrutura do aço permitiu identificar a homogeneidade, fases e possíveis falhas internas que possam comprometer sua durabilidade.

Por fim, os ensaios de corrosão realizados em laboratório e em condições reais de serviço forneceram uma avaliação abrangente do comportamento do material em ambientes corrosivos por cloro, permitindo a identificação dos mecanismos de corrosão e a eficácia das estratégias de mitigação.

Esses procedimentos de teste são indispensáveis para o desenvolvimento e a manutenção de tubos de aço que assegurem uma condução eficiente e segura de cloro, contribuindo para a redução de custos operacionais e a mitigação de riscos associados à corrosão.

3.4.1. Ensaio de dureza

A dureza superficial Brinell das amostras cilíndricas do tubo comercial e do tubo MADA foi medida no durômetro da Mitutoyo, modelo HR-300, baseado na norma JIS B 7726 ISO6508-2 (ASTM E18), que permite a medição de dureza por meio de métodos como Rockwell C (penetrador de diamante) e Brinell (opcional no durômetro, penetrador Brinell), com o objetivo de relacionar a força de usinagem e os valores de dureza. A Figura 3.11 mostra o durômetro utilizado. A medição de dureza foi realizada na mesma seção de uma região das amostras, à 60 mm da base dos tubos. Essa medida foi adotada com o objetivo de evitar a influência de variações de dureza que possam existir ao longo do comprimento da peça. Essas regiões correspondem as regiões em que foi feita a avaliação da força de usinagem.

Figura 3.11 – Durômetro utilizado no ensaio.

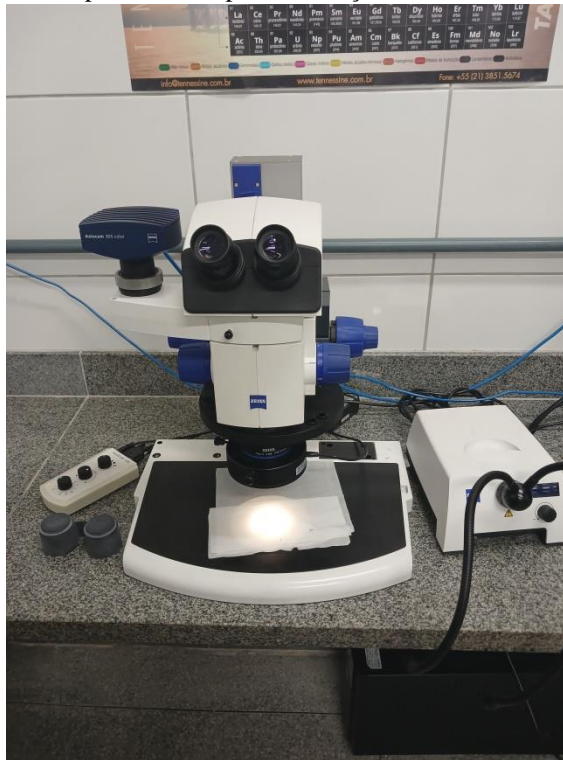


Fonte: Autor (2024).

No ensaio de dureza Brinell, é necessário utilizar um *kit* especial para garantir a precisão dos resultados. Esse *kit* é composto por um penetrador Brinell, uma esfera de aço temperado que será pressionada contra a amostra, que foi montado no equipamento. Além disso, é necessário um jogo de pesos montados para formar uma carga padronizada de 1839N, proporcionando a pressão adequada para o teste.

O penetrador de esfera utilizado nesse método possui um diâmetro de 2,5 mm. Após a aplicação da carga sobre a amostra e a remoção do penetrador, uma impressão foi deixada na superfície do material. Foram feitas três medidas, espaçadas em 90°, de dureza em cada uma das amostras tubulares. Para determinar a dureza de maneira precisa, é essencial realizar a medição do diâmetro dessa deformação com a ajuda de um microscópio, permitindo calcular com acurácia o raio de deformação do penetrador. O microscópio utilizado foi o ZEISS SteREO Discovery.V8, com uma câmera ZEISS Axiocam 305 color de 5 megapixels acoplada. O conjunto do microscópio está conectado a um computador com o *software* ZEN Imaging, utilizado para a visualização e processamento das imagens geradas no microscópio. A Figura 3.12 mostra o microscópio utilizado para medir o diâmetro da calota do ensaio de dureza.

Figura 3.12 – Microscópio utilizado para a medição de diâmetro do ensaio de dureza.



Fonte: Autor (2024).

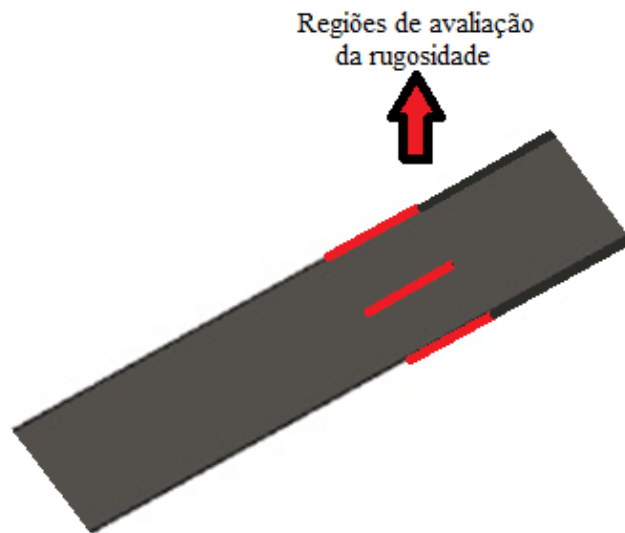
Assim, a combinação do penetrador de esfera, da carga controlada, da medição do raio de deformação e da posterior avaliação do diâmetro da deformação são os passos necessários no ensaio de dureza Brinell. O valor de dureza é consultado em tabelas de acordo com o penetrador diâmetro da impressão na amostra e carga aplicada. Esse processo permite obter informações sobre a dureza dos materiais ensaiados, fornecendo dados para a análise comparativa entre o tubo comercial e o tubo MADA e sua relação com a força de usinagem. Após a coleta, os dados foram organizados e verificados para identificar possíveis *outliers* ou erros de medição.

Para comparação estatística da dureza, foi realizada a ANOVA entre os grupos Tubo MADA e Tubo comercial. Cada amostra foi submetida a um teste de dureza padronizado, garantindo a consistência e a precisão das medições. Em seguida, utilizou-se a ANOVA para comparar as médias dos dois grupos. A ANOVA foi conduzida com um nível de significância (α) de 0,05 para testar a hipótese nula de que não há diferença significativa nas durezas médias entre os grupos. Este valor de α implica que há 95% de confiança de que as diferenças detectadas são estatisticamente significativas se o p-valor obtido for menor que 0,05.

3.4.2. Ensaio de rugosidade

A avaliação de acabamento superficial foi realizada nas duas amostras MADA que foram fabricadas com características diferentes e no tubo comercial. O aparelho utilizado para avaliar o acabamento foi o rugosímetro da marca Mitutoyo modelo SJ-210. A região avaliada foi submetida a usinagem de acabamento padrão. O aparelho foi configurado para uma velocidade de deslocamento de 0,5 mm/s, valor de comprimento de *cut-off* (λ_c) de 2,5 mm e comprimento de ruído de *cut-off* (λ_s) de 8 μm . Foram realizadas 3 medições na mesma região do comprimento, mas com giros de 90° para cada medição, conforme ilustrado na Figura 3.13.

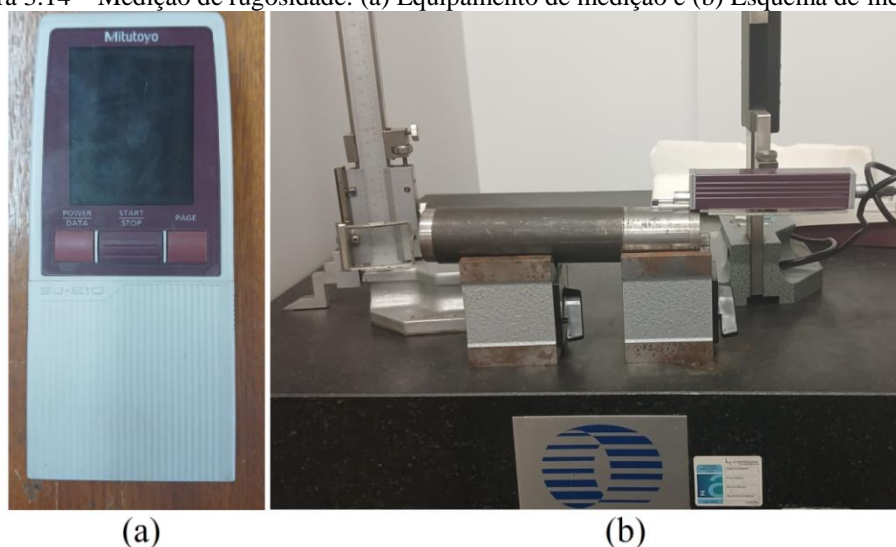
Figura 3.13 – Região de medição no ensaio de rugosidade.



Fonte: Autor (2024).

Foram considerados os valores de rugosidade: R_a , R_z e R_q para avaliação de acabamento superficial. A Figura 3.14 mostra os equipamentos e montagem para medição de rugosidade.

Figura 3.14 – Medição de rugosidade: (a) Equipamento de medição e (b) Esquema de medição.



Fonte: Autor (2024).

A superfície das amostras foi lavada com álcool isopropílico e seca com um pano para remover resíduos, sujeira, óleos, graxas ou contaminantes que possam estar presentes. Os parâmetros de medição foram configurados no rugosímetro, incluindo o uso do filtro Gauss e análise do perfil R. As amostras foram fixadas em um suporte, conforme ilustrado na Figura 3.14 (b), para a realização das medições de rugosidade.

3.4.3. Ensaio hidrostático

Para o ensaio hidrostático, foi fabricado um tubo pela MADA com dimensões conforme a Figura 3.2 (a). O tubo possui 1 polegada de diâmetro nominal e espessura de parede mínima de 4,55 polegadas, equivalente a um tubo Schedule 80. Foram realizados dois tipos de ensaio hidrostático: a) O primeiro, com maior duração e pressão de 15 bar por 3 horas, conforme os requisitos da empresa e b) o segundo, com pressão de 59 bar por 10 segundos, conforme a NBR 5590 e ambos os testes realizados a temperatura ambiente.

Os equipamentos utilizados para o ensaio hidrostático foram dois manômetros padrão analógicos de 28 bar e outro de 100 bar, marca ABSI, e dois manômetros auxiliares da marca WIKA. Para pressurização, foram utilizadas duas bombas de teste hidrostático da marca Super Ego, modelos TP 25 e TP 120. O tubo foi vedado com borracha de vedação de Policloropreno e um flange cego, conforme mostrado na Figura 3.15.

Figura 3.15 – Montagem do tubo para o ensaio hidrostático.



Fonte: Autor (2024).

A Figura 3.16 mostra o equipamento para o teste hidrostático e o tubo para teste.

Figura 3.16 – Equipamento para o ensaio hidrostático.



Fonte: Autor (2024).

O ensaio hidrostático no tubo de aço iniciou-se com a preparação adequada do tubo, incluindo a limpeza interna para remover quaisquer resíduos ou impurezas que possam afetar os resultados do teste. Em seguida, o tubo foi montado com as vedações apropriadas, como flanges com vedação de borracha, para garantir um sistema vedado e seguro. Para o ensaio de 15 bar, a pressão foi aumentada progressivamente, em incrementos de 5 bar a cada 20 segundos, até atingir a pressão de teste. A cada 30 minutos, foram monitoradas a queda de pressão e a integridade da peça. Para o ensaio de 59 bar, a pressão foi aumentada de maneira contínua, durante 5 segundos, até atingir a pressão de ensaio. Após atingir a pressão de ensaio, foram monitoradas a queda de pressão e a integridade do tubo para verificar possíveis falhas de vedação ou vazamentos. Após cada teste, o tubo foi inspecionado em busca de falhas ou deformações permanentes, garantindo a integridade estrutural e a segurança do tubo de aço em aplicações na condução de cloro líquido pressurizado.

3.4.4. Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado conforme as normas NBR 5590 e ASTM 370-24 (2024). Os testes foram conduzidos em amostras longitudinais de tamanho real, comparando os tubos fabricados para o ensaio, em temperatura ambiente. As peças foram padronizadas com diâmetro externo de 33,4 mm e furo interno de 22 mm de diâmetro. Os ensaios de tração foram executados na máquina servo-hidráulica Shimadzu UHF-600KNX, utilizando uma velocidade de 10 mm/min, abrangendo um intervalo mais amplo de módulo de elasticidade. A Figura 3.17 mostra o equipamento utilizado no ensaio de tração.

Figura 3.17 – Equipamento utilizado para o ensaio de tração.

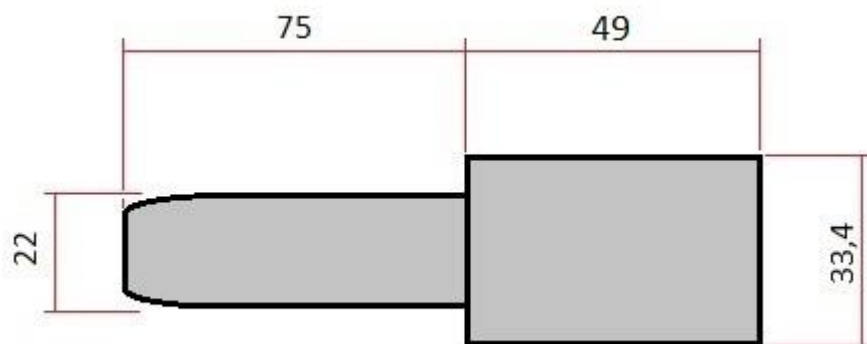


Fonte: Autor (2024).

As amostras testadas foram o material do: i) tubo usado atualmente, de aço ASTM A106 grau B e ii) o tubo MADA fabricado. Um plugue cilíndrico auxiliar de aço carbono foi inserido no interior dos tubos para evitar que as garras da máquina de ensaio deformassem as paredes do tubo, em conformidade com o exigido pela norma ASTM A370-24 (2024). A

Figura 3.18 mostra o desenho em vista do plugue auxiliar fabricado.

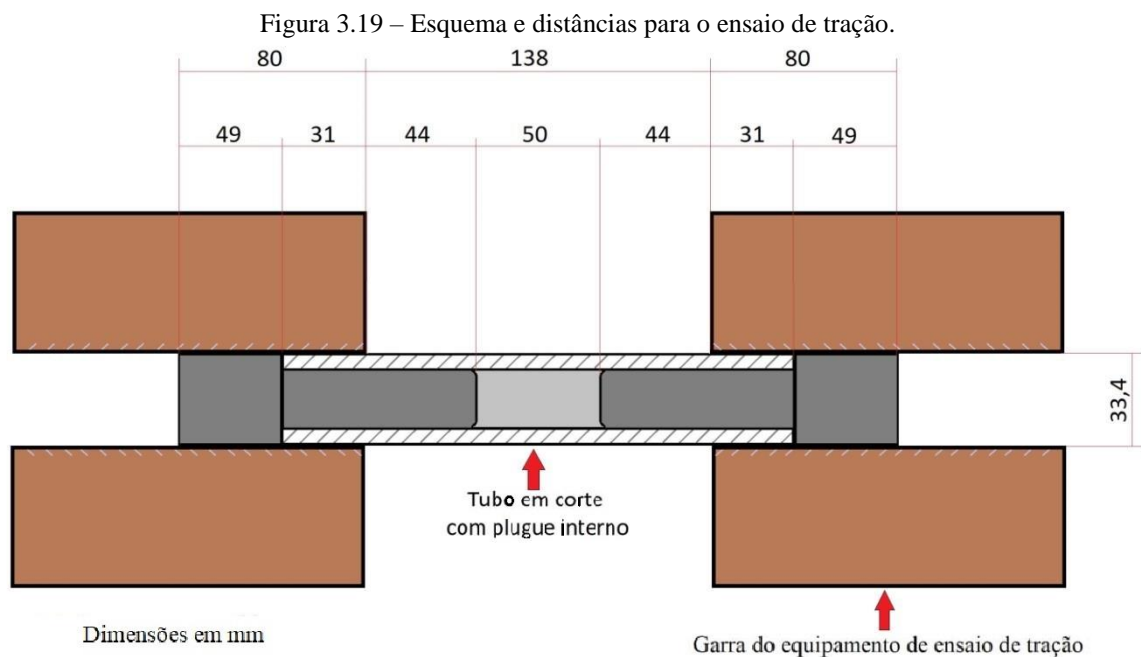
Figura 3.18 – Plugue auxiliar utilizado no ensaio de tração dos tubos.



Dimensões em mm

Fonte: Autor (2024).

Figura 3.18, permite observar que o plugue auxiliar, constituído de uma parte cilíndrica de 22 mm de diâmetro que foi inserido no interior do tubo e outra parte cilíndrica de 33,4 mm que auxiliará na fixação da garra de ensaio. Foram fabricados 6 plugues no total, e em cada tubo foi colocado um plugue em cada extremidade. O comprimento de referência efetivo foi de 50 mm e o comprimento total do tubo sem os plugues foi de 200 mm em todos os testes. A Figura 3.19 mostra o esquema de ensaio com as dimensões básicas.



Fonte: Autor (2024).

A Figura 3.19 apresenta a vista em corte do tubo com os plugues já introduzidos em ambas as extremidades do tubo, bem como as garras de fixação do equipamento para o ensaio de tração. Como o diâmetro interno do tubo foi padronizado em 22 mm, o limite até onde a garra pode se estender em relação ao plugue é de 44 mm.

3.4.5. Microestrutura e microdureza

Para a análise metalográfica, quatro regiões distintas das amostras foram verificadas: i) Flange MADA, que é a região mais inferior de fabricação (primeiras camadas de deposição); ii) Região inferior do tubo MADA; iii) Região superior do tubo MADA e iv) flange do tubo Atual. A preparação do corpo de prova e o ataque com solução Nital seguiram o procedimento a seguir:

- Preparação da Amostra: Corte da amostra preservando a área de interesse; realização do embutimento da amostra com resina semicondutora e lixamento

da superfície da amostra gradualmente com lixas de granulometrias #100, #220 #400, #600 e #1200 para remoção de imperfeições e polimento com alumina 1 μm .

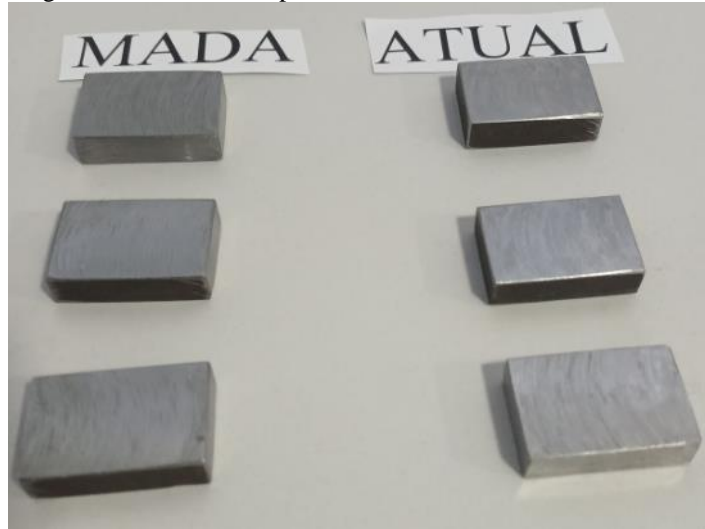
- Ataque com Solução Nital: Preparada a solução 74, nital, fresca a 5%; esfregação da amostra na solução Nital por um período inicial de 20 segundos para observar os efeitos iniciais do ataque; Foram efetuados novos ataques, mais curtos e incrementais, verificando a microestrutura revelada entre cada etapa; A amostra MADA foi observada sob um microscópio óptico ZEISS para analisar a microestrutura revelada pelo ataque com Nital.
- Análise Metalográfica: A amostra foi examinada, observando detalhes da microestrutura, como grãos, inclusões, fases e possíveis defeitos como porosidades.

A caracterização da microestrutura foi feita com microscopia óptica, seguindo o esquema de Anelli e Di Nunzio (1996), amplamente aceito para classificação em componentes soldados e que sofreram tratamentos térmicos. Além disso, foi realizada a avaliação da microdureza e da dureza do material, com o objetivo de corroborar a classificação previamente efetuada da microestrutura de cada região. Para todos os ensaios, foi aplicada uma carga de 0,01 kgf na avaliação da microdureza dos constituintes, com o objetivo de mensurar regiões menores. Para o ensaio de dureza das regiões ao longo do comprimento das amostras tubulares, foi utilizado a força de 5 kgf por 12 segundos. Foram realizadas dez medições, e os menores e maiores valores foram excluídos dos cálculos.

3.4.6. Ensaio de corrosão

Para o ensaio de corrosão em laboratório, foram testadas amostras fabricadas pela técnica MADA e o material do tubo atualmente utilizado, aço ASTM A106 grau B. Os corpos de prova de corrosão foram padronizados em formato de paralelepípedo com dimensões de 30mm x 20mm x 8mm. Foram confeccionadas 3 amostras de cada material, totalizando 6 amostras. A Figura 3.20 apresenta os corpos de prova.

Figura 3.20 – Amostras para o teste de corrosão em laboratório.



Fonte: Autor (2024).

A Figura 3.20 mostra duas etiquetas, denominadas "MADA", para as amostras fabricadas pela MADA, e "Atual", para as amostras do material do tubo atualmente em uso. As amostras foram lavadas para remover qualquer contaminação potencial. A lavagem final foi feita com água destilada.

O teste de corrosão foi realizado em laboratório físico-químico da SANEAGO, localizado na estação de tratamento Mauro Borges, em Goiânia-GO. A temperatura foi controlada em aproximadamente 23°C. O laboratório possui estrutura para trabalhos diversos com produtos químicos e microbiológicos, contendo capelas, balanças de precisão, instrumentos para medição e controle de temperatura, medição de pH, vidrarias diversas e outros materiais para execução dos trabalhos. A Figura 3.21 mostra a foto da entrada do laboratório.

Figura 3.21 – Entrada do Laboratório que foi feito o ensaio de corrosão.



Fonte: Autor (2024).

O ensaio de corrosão em laboratório foi executado durante o período de 1 semana com três soluções diferentes de 250ml: i) Solução aquosa produzida com 400g de cloro em 1 litro de água destilada (Cl_2 e água), com *tag* de $\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O}$, com formação preferencial de ácidos fortes, como ácido clorídrico; ii) Solução aquosa de Tricloro-S-Triazina-Triona (tricloro) com 90% de cloro ativo, com *tag* de TriCl 90%, com formação de cloretos, ácidos fortes e fracos, e iii) Solução aquosa de Hipoclorito de Sódio com concentração ativa de 12%, com *tag* de Hipo 12%, com formação de ácidos fracos, como ácido hipocloroso. Na solução "i", do ensaio de corrosão em laboratório, apesar da diluição do cloro gás na água ser de cerca de 3.500 mg/l, devido a limitações do equipamento de dosagem de gás cloro quanto ao mínimo dosado e também com objetivo de obter uma solução com a máxima concentração de cloro, foi utilizado a dosagem citada de 400g/litro.

A corrosão dos metais por cloro úmido ocorre por diversos mecanismos, resultando da formação de subprodutos do cloro que promovem o ataque corrosivo. A solução "i", composta por $\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O}$, investigou o ataque corrosivo de ácidos fortes, que é o efeito mais comum em situações de cloro em contato com umidade. A solução "ii", composta por TriCl 90%, avaliou a corrosão causada por cloretos, ácidos fortes e fracos. Por fim, a solução "iii" foi utilizada para estudar a corrosão preferencial relacionada a ácidos fracos. A Figura 3.22 apresenta o equipamento para dosagem de cloro, Clorador Siemens, modelo V-2000 *Gas Feed System*,

que é utilizado na dosagem de cloro da estação e também possui ponto para dosagem com água destilada, que é usado para ensaios e testes.

Figura 3.22 – Equipamento clorador, utilizado para dosagem de cloro.



Fonte: Autor (2024).

Recipientes de vidro, béqueres, de 250 ml foram utilizados para o teste de corrosão com as soluções mencionadas. A Figura 3.23 mostra os recipientes de vidro preparados para o ensaio, já identificados.

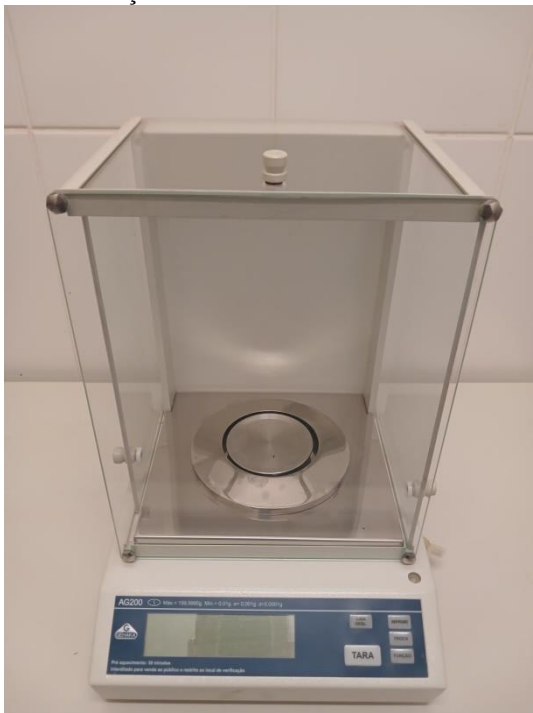
Figura 3.23 – Béqueres utilizados para os ensaios de corrosão.



Fonte: Autor (2024).

O critério de avaliação de corrosão utilizado foi a variação de massa antes e depois do ensaio e a taxa de corrosão. As amostras foram pesadas em balança GEHAKA, modelo AG200, conforme Figura 3.24, devidamente calibrada. Os resultados foram comparados para determinar a perda ou ganho de massa devido ao processo de corrosão e taxa de corrosão anual.

Figura 3.24 – Balança analítica com divisão de leitura de 0,0001 g.



Fonte: Autor (2024).

Após o término do ensaio de corrosão em laboratório, as amostras foram lavadas com água e detergente neutro, para retirada de camadas de corrosão e oxidação e em seguida observadas em microscópio óptico ZEISS, para verificar os mecanismos de corrosão predominantes para cada meio corrosivo testado.

Para garantir a segurança e verificar a durabilidade real dos componentes utilizados em ambientes corrosivos por cloro, além do ensaio de corrosão em laboratório, é essencial realizar ensaios de corrosão em serviço. Este ensaio foi executado em um tubo de cloro fabricado pela MADA, em que foram medidas a espessura, a massa do tubo, análise das condições de roscas e paredes de vedação para analisar a resistência à corrosão ao longo do tempo. A medição de espessura foi feita com medidor ultrassônico digital CAMWAY, modelo CAMWT167USV. A Figura 3.25 mostra o medidor de espessura utilizado.

Figura 3.25 – Medidor de espessura utilizado.

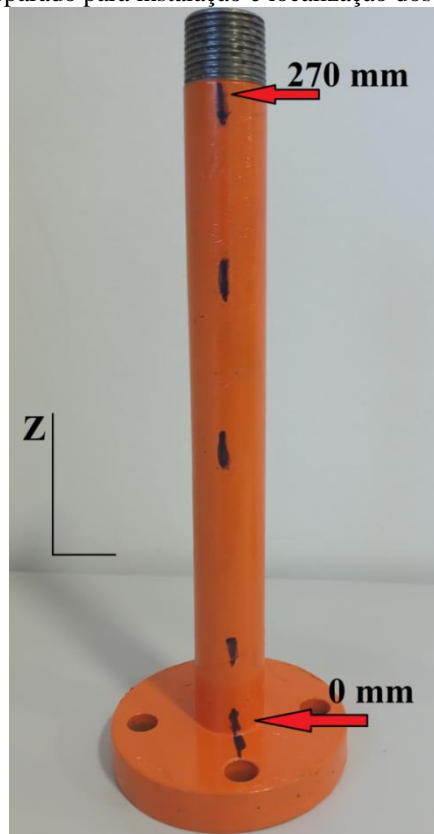


Fonte: Autor (2024).

Para a realização do ensaio, a espessura do tubo foi medida inicialmente, estabelecendo uma linha de base para futuras comparações. Essa medição permitiu identificar qualquer redução na espessura do tubo ao longo do tempo, indicando a taxa de corrosão que o material sofreu.

Além da espessura, a massa do tubo foi medida antes da exposição ao cloro. Pesando o tubo após o ensaio, foi possível detectar a perda de material devido à corrosão. Uma redução na massa do tubo indicou que o material se degradou, proporcionando dados quantitativos sobre a taxa de corrosão. A vazão média de cloro líquido foi monitorada, para ser relacionada com a taxa de corrosão. A Figura 3.26 exibe o tubo fabricado por MADA, já pintado, preparado para instalação.

Figura 3.26 – Tubo MADA preparado para instalação e localização dos pontos de medição de espessura.



Fonte: Autor (2024).

Conforme visto na Figura 3.26, o tubo fabricado utilizando a MADA foi pintado na cor padrão laranja para identificar o transporte de cloro líquido, além de possuir pontos de referência visíveis para a medição de espessura, localizados apenas na parte tubular, excluindo o flange. A referência para o eixo Z foi estabelecida considerando a base do tubo conectada ao flange como ponto inicial. Foram realizadas cinco medições de espessura em diferentes regiões ao longo do comprimento relativo ao eixo Z do tubo, sendo a primeira na base da região tubular, com referência no eixo Z de 0 mm. As outras quatro medições foram realizadas ao longo do eixo Z nas distâncias de 50 mm, 130 mm, 200 mm e 270 mm. Este tubo permaneceu em serviço por pouco mais de 3 meses, totalizando 102 dias de instalação até ser retirado para avaliar os efeitos da corrosão. Esses efeitos foram comparados com os dados previamente existentes na empresa para o tubo atualmente utilizado (tubo atual - aço ASTM A106 grau B), considerando a perda de massa, a redução de espessura e a taxa de corrosão. Os dados do tubo atual referem-se a um período de pouco mais de 2 meses, somando 67 dias.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos resultados obtidos para a peça fabricada por MADA, foram analisados diversos aspectos essenciais para avaliar sua qualidade e desempenho. Inicialmente, a fabricação preliminar foi conduzida com parâmetros de deposição otimizados para garantir a integridade estrutural e dimensional da peça. Em seguida, realizou-se o ensaio de dureza na região a ser usinada para verificar a uniformidade e resistência superficial, enquanto as etapas de usinagem e acabamento asseguraram a precisão das dimensões finais. O desempenho mecânico foi avaliado através do ensaio hidrostático e do ensaio de tração, garantindo a peça para aplicações de alta pressão e carga. A caracterização da microestrutura por microscopia óptica revelou detalhes sobre a formação das fases internas e possíveis heterogeneidades. Por fim, os ensaios de corrosão demonstraram a resistência do material em ambientes agressivos por cloro e seus subprodutos, complementando a avaliação abrangente dos resultados obtidos para a peça fabricada por MADA.

4.1. Fabricação preliminar e parâmetros de deposição

Nos resultados das análises realizadas, a fabricação preliminar das peças foi conduzida com o objetivo de determinar as condições ótimas de deposição. O foco principal foi na avaliação da face retilínea do flange, garantindo a integridade estrutural e a precisão dimensional das peças produzidas, facilitando o pós processamento do tubo.

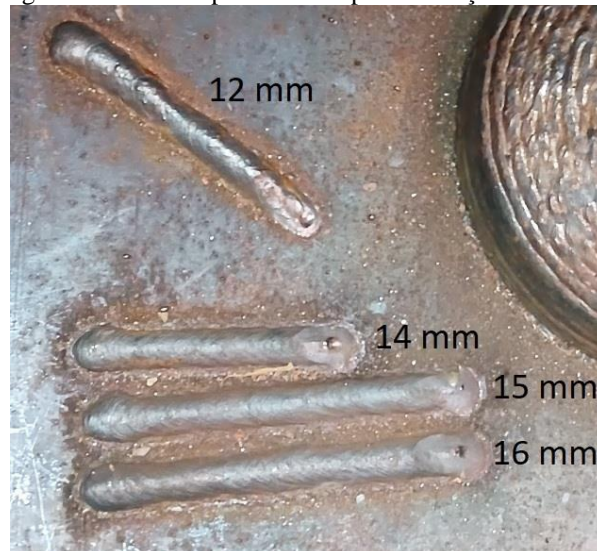
Além disso, foi dada especial atenção à ausência de defeitos, principalmente de porosidades. A presença de porosidades em peças fabricadas por MADA pode comprometer significativamente a resistência mecânica, a durabilidade e a selagem do tubo em termos de vazamentos do conteúdo conduzido. Defeitos como esses podem atuar como pontos de concentração de tensão, levando a falhas prematuras, especialmente em aplicações críticas como o transporte de cloro em que a confiabilidade é primordial. A ausência de defeitos é, portanto, fundamental para assegurar a qualidade e a performance dos tubos, garantindo sua adequação para as exigências operacionais a que serão submetidas.

Os resultados preliminares indicam que o controle rigoroso dos parâmetros de deposição foram essenciais para atingir a qualidade desejada, tanto em termos de geometria e dimensões adequados e qualidade final da peça, destacando a necessidade de monitoramento contínuo e ajustes precisos durante cada camada de deposição do processo de fabricação.

Para a definição da DBCP utilizada na fabricação, o valor de 12 mm apresentou grande quantidade de respingos durante os testes. Em termos de qualidade da camada

depositada, os aspectos visuais foram bons, sem porosidade ou outros defeitos visíveis. A utilização de valores maiores de DBCP resultou em menor quantidade de respingos, mantendo a boa qualidade da camada depositada. O valor de 16 mm foi adotado como valor de deposição, o que resultou em uma boa transferência do arame e estabilidade do arco, apresentou menor quantidade de respingos, além de garantir uma qualidade satisfatória na camada de deposição. A velocidade de alimentação do arame também passou por otimização, observando-se que valores acima de 3,1 m/min ocasionaram um aumento na geração de respingos e um maior alargamento entre as camadas (maior largura da poça de fusão). Por isso, a velocidade de alimentação foi fixada em 3,1 m/min. A Figura 4.1 ilustra os testes iniciais realizados para definir a DBCP.

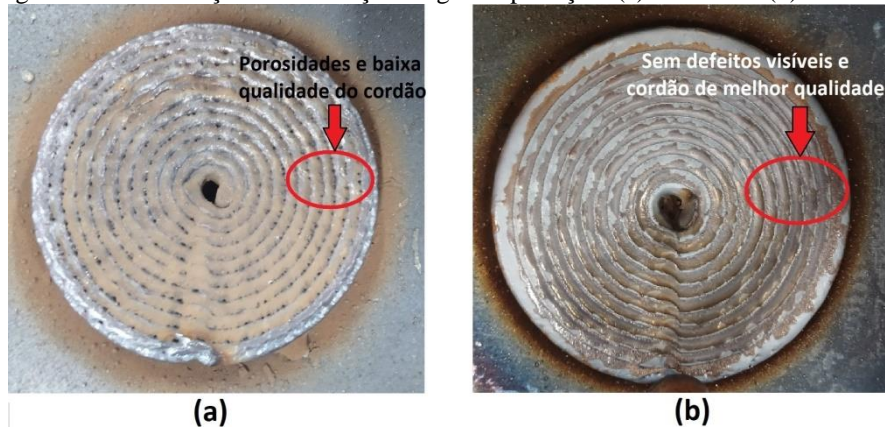
Figura 4.1 – Testes preliminares para definição da DBCP.



Fonte: Autor (2024).

Em relação à vazão do gás de proteção, foi realizada uma variação nos valores, de 20 l/min a 31 l/min. O arco elétrico formado foi analisado, considerando a estabilidade, a ocorrência de respingos e a qualidade da face fabricada, através da avaliação visual do cordão de deposição. A análise realizada foi qualitativa, sem medição direta de qualquer das variáveis citadas. Na Figura 4.2, são apresentadas as peças resultantes da fabricação com vazão de 20 l/min e de 31 l/min.

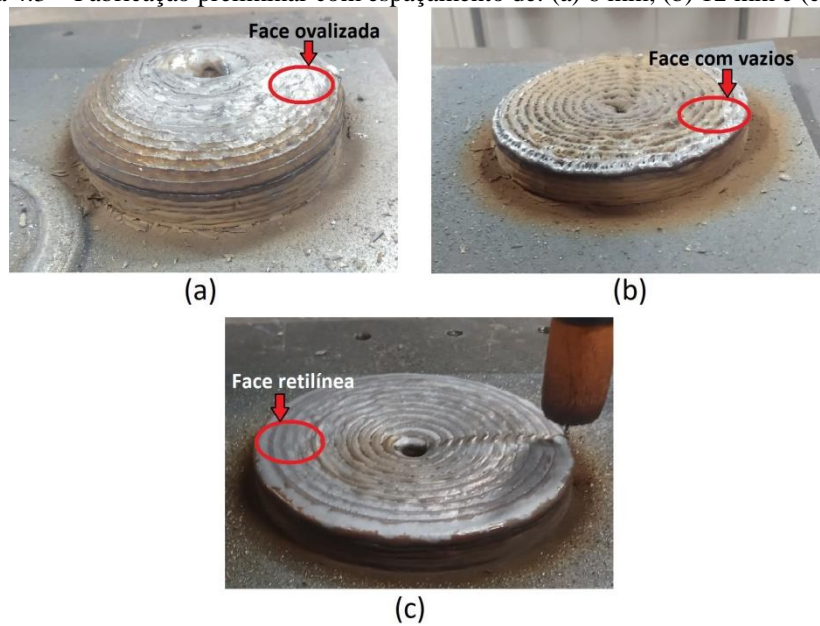
Figura 4.2 – Fabricação com variação do gás de proteção: (a) 20 l/min e (b) 31 l/min.



Fonte: Autor (2024).

Analisando a Figura 4.2 (a), para uma vazão de 20 l/min, a camada resultante apresentou grande quantidade de porosidade e também um cordão de deposição com baixa qualidade. Para a vazão de 31 l/min, conforme visto na Figura 4.2 (b), a qualidade das camadas depositada foi superior, sem defeitos visuais e com o cordão de deposição apresentando boa qualidade. Em termos de geometria da face do flange, a Figura 4.3 mostra as fabricações preliminares para ajuste do espaçamento fixo entre os círculos de 6 mm, 9 mm e 12 mm.

Figura 4.3 – Fabricação preliminar com espaçamento de: (a) 6 mm; (b) 12 mm e (c) 9 mm.



Fonte: Autor (2024).

Observando a Figura 4.3 (a), com espaçamento de 6 mm entre os círculos de fabricação, a face resultante apresentou formato oval, com maior altura no centro e menor nas periferias, indicando sobreposição entre cada etapa de fabricação. Na Figura 4.3 (b), com espaçamento de 12 mm, a face apresentou vazios entre os círculos de fabricação, indicando falta de material entre cada etapa de fabricação. Já na Figura 4.1 (c), com espaçamento de 9 mm, foi obtida uma face linear, com poucas ondulações e desvios. A Tabela 4.1 apresenta o resumo dos parâmetros definidos para fabricação por MADA do tubo flangeado para condução de cloro.

Tabela 4.1 – Parâmetros de deposição definidos para fabricação do tubo.

Espaçamento entre círculos (mm)	Tensão de referência (V)	ks e kd	Velocidade de alimentação (m/min)	DBCP (mm)	Vazão do gás de proteção (l/min)
9	19 V	60	3,1	16	31

Fonte: Autor (2023).

Com os parâmetros definidos, avançou-se para a etapa de fabricação de um tubo com as dimensões apropriadas. A cada camada, aguardou-se 90 segundos para o resfriamento adequado, sendo realizada em seguida a inspeção visual, que indicou uma boa qualidade em todas as camadas. Na Figura 4.4, é possível observar o manipulador robótico em funcionamento e a seção do tubo já fabricada.

Figura 4.4 – Manipulador robótico fabricando peça tubular.



Fonte: Autor (2023).

A Figura 4.4 também evidencia a peça, destacando-a em seu estado bruto, sem qualquer usinagem de acabamento. Nos resultados da amostra preliminar fabricada por MADA, foi conduzida uma inspeção visual detalhada após a deposição de cada camada. Durante essa análise, foram identificados defeitos frequentes em processos de soldagem, tais como porosidades, trincas, inclusões de escória, falta de fusão, distorções e deformações. A Figura 4.5 destaca o tubo logo após a finalização da última camada de deposição.

Figura 4.5 – Tubo fabricado por MADA.



Fonte: Autor (2023).

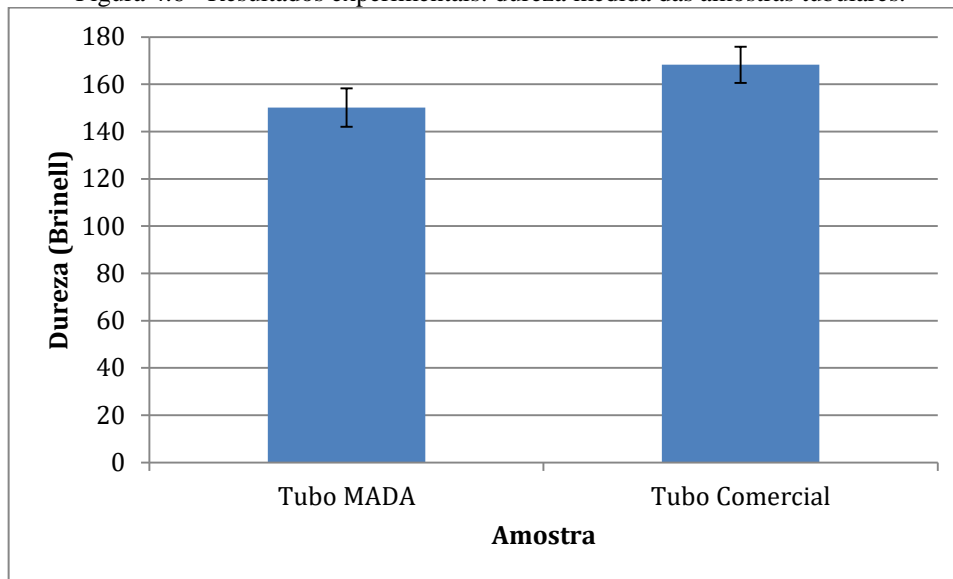
Após a fabricação dos tubos, foi realizada uma inspeção visual da peça recém-fabricada, conforme exibido na Figura 4.5, para verificar a existência de defeitos. Além disso, os aspectos geométricos da fabricação foram monitorados, com especial atenção voltada para a face reta do flange. Essa avaliação contemplou a verificação de fatores geométricos essenciais, visando garantir a precisão dimensional e a conformidade com as especificações projetadas.

A combinação dessas verificações permitiu assegurar a integridade estrutural e a qualidade do tubo fabricado, ao mesmo tempo em que garantiu que a geometria da peça atendesse aos requisitos necessários para seu uso final. A detecção precoce de quaisquer imperfeições ou desvios geométricos evita problemas acumulados em etapas posteriores do processo de fabricação e nos ensaios realizados.

4.2. Ensaio de Dureza, Usinagem e Acabamento da peça

Com relação a dureza da região de usinagem das amostras, a Figura 4.6 exhibe os valores medidos. A amostra comercial tem dureza declarada pelo fabricante na faixa de 145 a 180 HB. Logo, a amostra utilizada nos ensaios apresentou dureza coerente à especificação, ligeiramente superior às amostras fabricadas por MADA.

Figura 4.6 - Resultados experimentais: dureza medida das amostras tubulares.



Fonte: Autor (2023).

Conforme visto na Figura 4.6, o tubo MADA, apresentou dureza de 150 Brinell e o tubo comercial apresentou dureza de 168 Brinell. A Tabela 4.2 resume os valores de dureza das amostras e a respectiva incerteza.

Tabela 4.2 – Valores de dureza medidos.

Amostra	Dureza (Brinell)
Tubo MADA	150 ± 8
Tubo Comercial	168 ± 7

Fonte: Autor (2023).

Os valores de dureza das amostras MADA estão próximos aos encontrados por Khan *et al.* (2024) e também por Mohammadi *et al.* (2024). Rodrigues *et al.* (2023) encontraram valores um pouco maiores para peças MADA fabricadas com arame ER70S6, chegando a cerca de 160 HB. Conforme descrito na metodologia, uma análise de variância (ANOVA) foi realizada para avaliar as diferenças nos valores de dureza entre os diferentes grupos experimentais das amostras MADA. Os dados de dureza utilizados na análise estão detalhados na Tabela 4.3. A ANOVA foi conduzida para determinar se havia diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos grupos.

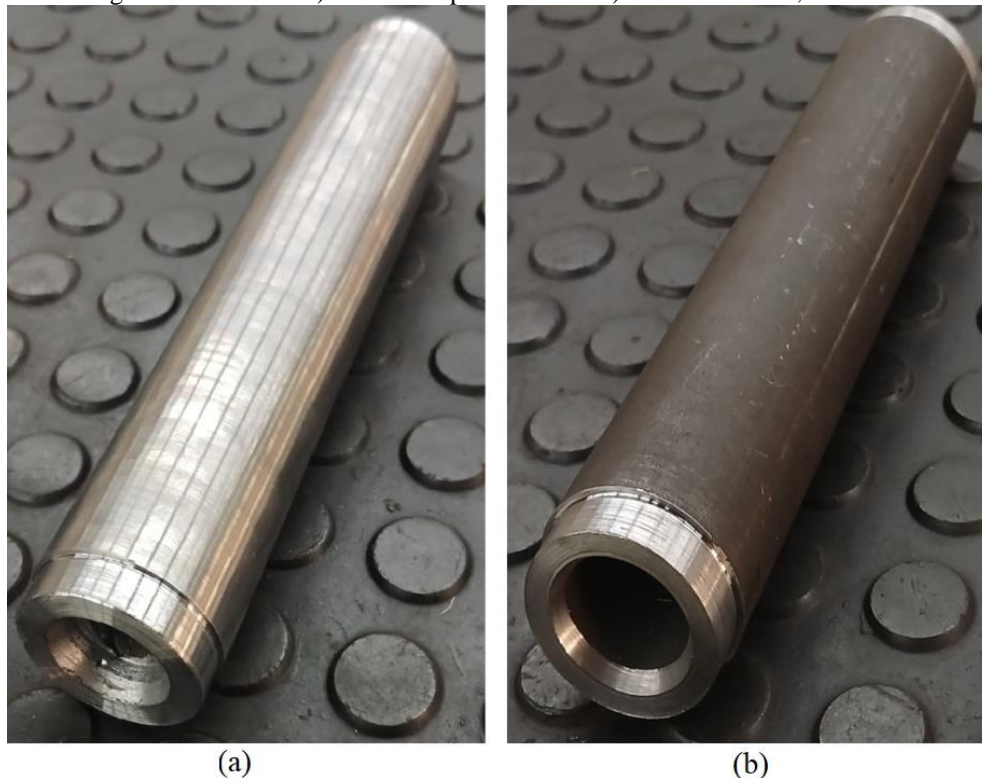
Tabela 4.3 – Resultado da ANOVA para a dureza das amostras fabricadas por MADA.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	491,57	1,00	491,57	5,31	0,08	7,71
Dentro dos grupos	370,52	4,00	92,63			
Total	862,09	5				

Fonte: Autor (2023).

Os resultados da ANOVA indicaram que não houve uma diferença significativa entre os grupos de tubo fabricados por MADA e o tubo comercial. O valor F obtido foi de 5,31, abaixo do valor crítico de 7,71, com um p-valor correspondente de 0,08 ($\alpha = 0,05$), o que permite aceitar a hipótese nula de que as médias dos grupos são iguais. Isso sugere que os valores de dureza entre os tubos fabricados por MADA e o comercial foram estatisticamente iguais, comprovados pela ANOVA, com 5% de significância. Na Figura 4.7, as amostras utilizadas nos ensaios são apresentadas na condição pós-usinagem, um tubo comercial SAE 1020 e a amostra fabricada pelo processo de MADA.

Figura 4.7 – Tubos: a) fabricados por MADA e b) Tubo comercial, usinados.

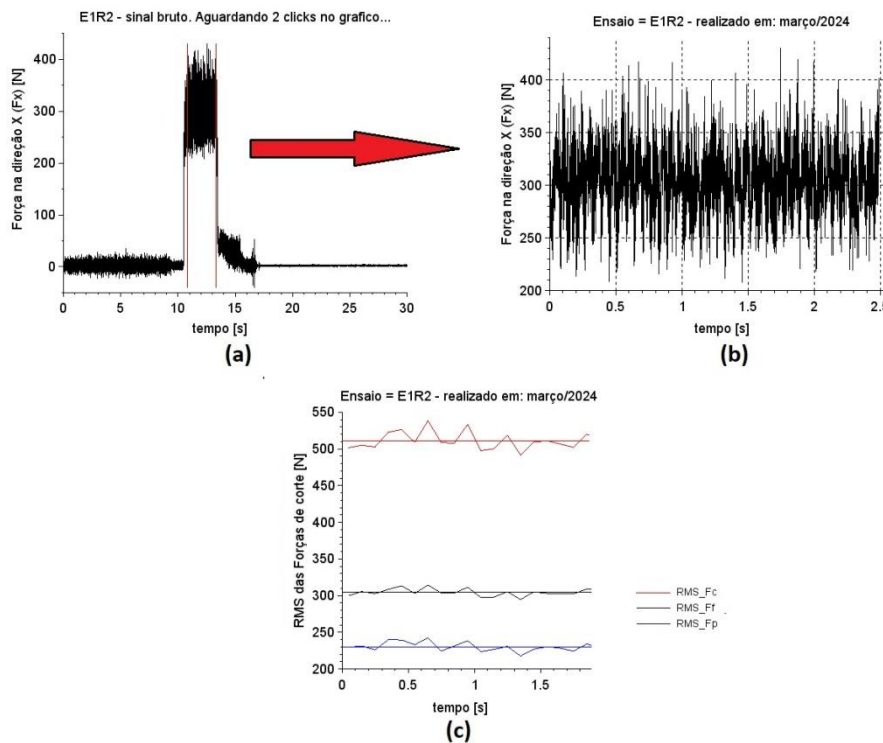


Fonte: Autor (2024).

A Figura 4.8 e Figura 4.9 apresentam os dados dos gráficos de sinal bruto referentes à força de usinagem para um avanço de 0,15 mm/rot. As figuras ilustram as etapas envolvidas

no tratamento do sinal das forças relacionadas à usinagem e a subsequente obtenção do gráfico de RMS dessas forças. Inicialmente, o sinal bruto das forças foi capturado durante o processo de usinagem. Em seguida, esse sinal foi filtrado para eliminar ruídos e interferências, assegurando a precisão dos dados. Após a filtragem, realizou-se a transformação dos dados para extrair parâmetros relevantes, culminando no cálculo do RMS, que fornece uma medida estável das forças ao longo do tempo. Por fim, o gráfico de RMS foi gerado para F_c , F_p e F_f , apresentando de maneira clara as variações das forças durante o processo de usinagem, sendo uma ferramenta fundamental para análise e otimização das condições de corte e operação. A Figura 4.8 é referente ao tubo MADA.

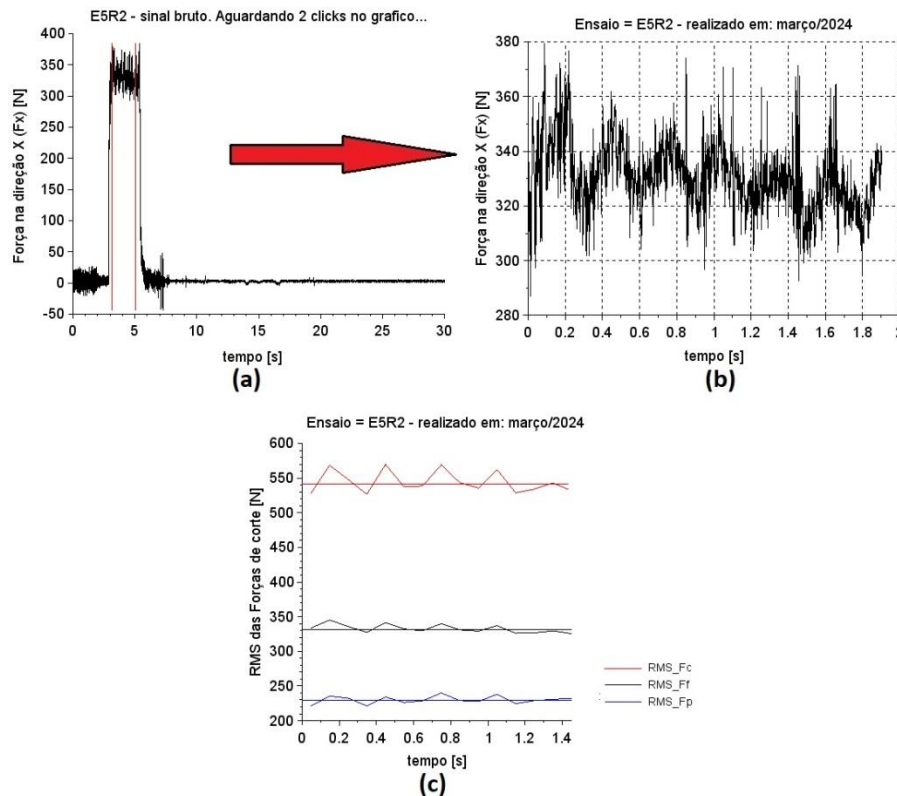
Figura 4.8 – Gráficos de força de usinagem tubo MADA: (a) sinal bruto, (b) sinal na região efetiva de usinagem e (c) RMS das forças de usinagem.



Fonte: Autor (2024).

A Figura 4.8 apresenta os gráficos relacionados ao tubo MADA, para um avanço de 0,15 mm/rot, referente a segunda repetição. A Figura 4.9 é referente ao tubo comercial.

Figura 4.9 – Gráficos de força de usinagem tubo comercial: (a) sinal bruto, (b) sinal na região efetiva de usinagem e (c) RMS das forças de usinagem.



Fonte: Autor (2024).

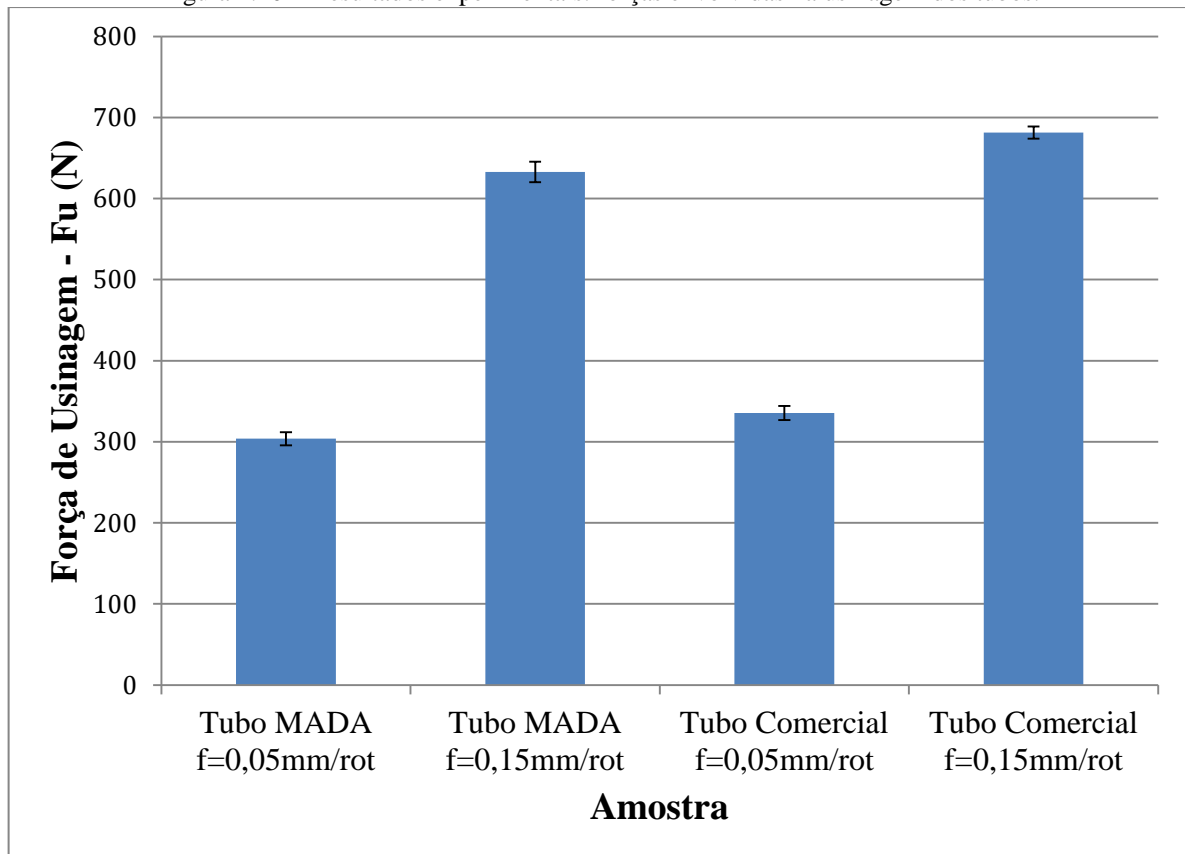
A Figura 4.9 apresenta os gráficos relacionados ao tubo comercial, para um avanço de 0,15 mm/rot, referente a segunda repetição. A partir do gráfico de sinal bruto, a região onde ocorre a usinagem foi cuidadosamente identificada e extraída para uma análise mais detalhada, conforme destacado na Figura 4.8 (a) e Figura 4.9 (a). Nestas figuras, é possível visualizar claramente a porção do sinal que corresponde ao processo efetivo de usinagem, destacadas por duas linhas vermelhas, verticais e paralelas.

Uma vez extraída a região relevante, o gráfico correspondente foi gerado e é apresentado na Figura 4.8 (b) e Figura 4.9 (b). Estes gráficos fornecem uma visão mais clara e precisa da força de usinagem durante a operação, eliminando ruídos e partes irrelevantes do sinal que não correspondem ao processo analisado.

Adicionalmente, a Figura 4.8 (c) e Figura 4.9 (c) ilustram os valores RMS das forças relacionadas à usinagem dos tubos (F_c , F_p e F_f). Os valores RMS fornecem uma medida eficaz da magnitude da força de usinagem, permitindo uma avaliação consistente e comparativa do desempenho das operações de usinagem. Estes resultados são essenciais para compreender a dinâmica da força de usinagem e para otimizar os parâmetros operacionais.

A Figura 4.10 ilustra, em um gráfico de barras, os resultados das forças de usinagem (F_u) calculadas com base nos valores RMS das outras componentes de força medidas para todos os ensaios. Analisando aos pares, observa-se o aumento de F_u em função do avanço de 0,05 mm/rot para 0,15 mm/rot, tendo em vista que o aumento deste parâmetro de usinagem implica diretamente no incremento da área de corte. A amostra comercial demandou maior força de usinagem em comparação à amostra obtida por MADA.

Figura 4.10 – Resultados experimentais: forças envolvidas na usinagem dos tubos.



Fonte: Autor (2024).

Conforme mostrado na Figura 4.10 e na Tabela 4.4, a ordem decrescente de força de usinagem (valor eficaz) foi: i) para o aço comercial SAE 1020, apresentando maior força e ii) seguido da amostra MADA. O Tubo MADA apresentou, para os avanços de 0,05 mm/rot e 0,15 mm/rot, uma força de usinagem 9,5% e 7,1%, respectivamente, menor do que a amostra de aço comercial. A Tabela 4.4 resume os valores de força de usinagem e a respectiva incerteza.

Tabela 4.4 – Resultados obtidos da força de usinagem.

Amostra	Avanço (mm/rot)	Força de usinagem RMS (N)
Tubo MADA	0,05	303,8 ± 8,1
	0,15	632,8 ± 12,8
Tubo Comercial	0,05	335,6 ± 8,7
	0,15	681,4 ± 7,6

Fonte: Autor (2024).

Para avanços de 0,1 mm/rot, Barbosa *et al.* (2021) encontraram valores entre 230 N e 360 N para usinagem em aços. Por outro lado, Krajčoviech *et al.* (2021), para avanços de 0,175 mm/rot, obteve resultados de força de usinagem que variaram entre 450 N e 700 N em aço carbono. Os valores de força de usinagem RMS calculados têm como base os valores RMS das outras componentes da força de usinagem. Essas componentes são resultantes de várias medições de força no momento da usinagem, realizadas a cada 0,001 segundo, para cada uma das três repetições para cada avanço. Para cada uma dessas medições de componentes, pode-se calcular a força de usinagem correspondente. Para uma análise de dispersão, é necessário utilizar os dados referentes às várias medições realizadas. Assim, para os valores medidos dessas várias medições de componentes de força, a Tabela 4.5 destaca os valores médios do desvio padrão para a força de usinagem.

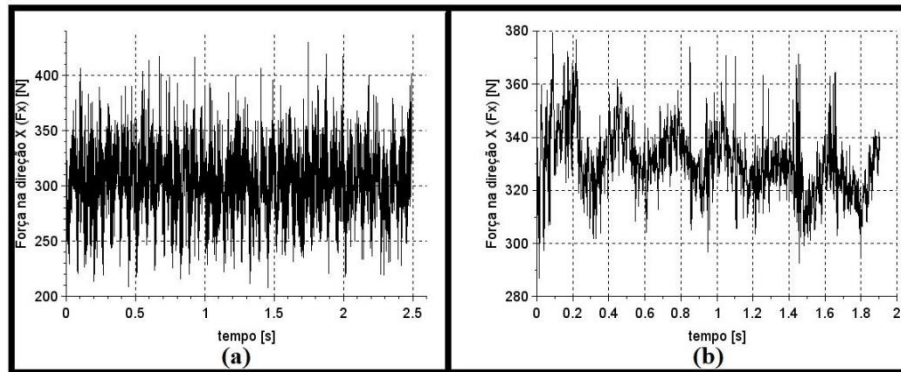
Tabela 4.5 – Desvio padrão para os dados de força de usinagem.

Amostra / Avanço (mm/rot)	Desvio padrão da Força de usinagem (N)
MADA / 0,15	59,4
Comercial / 0,15	39,4
MADA / 0,05	38,8
Comercial / 0,05	19,3

Fonte: Autor (2024).

A amostra MADA apresentou maior desvio padrão, seguido da amostra comercial. A Figura 4.11 reflete o resultado da Tabela 4.5, mostrando a dispersão dos dados de força para a replica 2, referente ao avanço de 0,15 mm/rot.

Figura 4.11 – Gráfico de força para avanço de 0,15 mm/rot: (a) Tubo MADA e (b) Tubo comercial.



Fonte: Autor (2024).

Pela Figura 4.11 (b) é possível notar a dispersão exibida pelas amostras usinadas. A amostra de tubo comercial apresenta um gráfico uniforme, quando comparado a amostra MADA. A Tabela 4.6 mostra os valores de pico da força de usinagem, para um avanço de 0,05 mm/rot.

Tabela 4.6 – Valor máximo da força de usinagem para cada amostra, para um avanço de 0,05 mm/rot.

Amostra	Valor máximo da força de usinagem (N)
MADA	438
Comercial	366

Fonte: Autor (2024).

Pela Tabela 4.6, é possível observar que o tubo MADA apresentou maior valor de pico em relação a amostra Comercial. Para o avanço de 0,15 mm/rot a relação foi a mesma, com o tubo MADA apresentando maior valor de pico. A Tabela 4.7 mostra os resultados da ANOVA, com 5% de significância, analisando a força de usinagem das duas amostras, considerando o tipo de material (MADA e comercial), o avanço e o valor da dureza.

Tabela 4.7 – ANOVA para os três materiais testados.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	635359	3	211786	21,94	0,00004	3,49
Dentro dos grupos	115850	12	9654			

Fonte: Autor (2024).

Pelo valor P e F, na Tabela 4.7, é possível estabelecer que o tipo de material afeta o valor da força de usinagem. Em termos de fatores que afetam a força de usinagem, o valor de

avanço e o de dureza média são significativos, sendo o avanço o fator mais relevante, com valor P de 0,0003, enquanto a dureza apresentou valor P de 0,03.

Foi realizada a análise do acabamento superficial de tubo fabricado pela MADA e de uma referência comercial. A análise da rugosidade superficial de um tubo é fundamental para entender suas propriedades funcionais e determinar sua adequação para a aplicação industrial. Nesta seção, serão apresentados os dados obtidos durante a avaliação da rugosidade superficial, incluindo parâmetros Ra, Rz e Rq. A análise desses resultados permitiu uma compreensão detalhada da qualidade da superfície do tubo e sua influência no desempenho em condições operacionais específicas, como a resistência ao desgaste, a fricção e a eficiência na condução de cloro líquido. A Tabela 4.8 mostra os resultados obtidos para as rugosidades citadas para os tubos MADA e comercial, respectivamente.

Tabela 4.8 - Valores obtidos na medição de rugosidade superficial.

Réplica	Tubo	Ra	Rq	Rz
1	MADA	4,147	5,116	25,043
2	MADA	3,954	4,988	23,039
3	MADA	3,934	4,812	21,533
1	Comercial	3,929	4,84	22,414
2	Comercial	3,983	4,892	22,539
3	Comercial	4,037	4,937	22,747

Fonte: Autor (2024).

Conforme a Norma ISO 1302 (2002), a classificação de acabamento para o Tubo MADA e comercial é N9. Os valores encontrados pela referência estão próximos aos valores da Tabela 4.8, referentes à usinagem de acabamento em aços, semelhantes aos identificados por Barbosa (2021). Para Ra, as referências citam valores entre 2 μm e 6 μm ; para Rq, entre 3 μm a 7 μm ; e para Rz, entre 13 μm e 29 μm . A Tabela 4.9 mostra a ANOVA das interações entre os tubos e as rugosidades para as três medições efetuadas.

Tabela 4.9 - ANOVA dos dados medidos de rugosidade.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	0,28	1	0,28	0,53	0,48	4,75
Colunas	1360	2	680	1287	1E-14	3,89
Interações	0,34	2	0,17	0,32	0,73	3,89
Dentro	6,34	12	0,53			
Total	1367	17				

Fonte: Autor (2024).

Pela Tabela 4.9 é possível observar que a relação dos fatores não é significativa. Tanto o valor de F e F crítico como o valor-P mostram este resultado, com significância de 5%. Avaliando os resultados da ANOVA com o teste de Tukey, com uma diferença mínima significativa (DMS) de 1,54, a Tabela 4.10 mostra as interações.

Tabela 4.10 - Interação entre os tubos para a rugosidade.

Rugosidade	Interação	Média 1	Média 2	Módulo da média	Conclusão
Ra	MADA-Comercial	4,01	3,983	0,03	Não Significativo
Rq		4,97	4,889	0,08	Não Significativo
Rz		23,2	22,566	0,63	Não Significativo

Fonte: Autor (2024).

Conforme apresentado na Tabela 4.10, não há diferença entre os valores de Ra, Rq e Rz nos tubos confirmando a igualdade estatística.

4.3. Ensaio hidrostático

Os resultados obtidos a partir do ensaio hidrostático no tubo MADA flangeado foram arquivados e registrados. Primeiro foi realizado o ensaio de 15 bar por 3 horas e posteriormente, no mesmo tubo, efetuado o ensaio de 59 bar por 10 segundos. A Figura 9 mostra a peça montada com o flange cego, pronta para o ensaio.

Figura 4.12 - Tubo preparado para o ensaio hidrostático.



Fonte: Autor (2024).

No primeiro teste que foi realizado, com pressão de 15 bar, a cada 30 minutos foram monitoradas a queda de pressão e a integridade da peça e registrado o resultado. Nenhuma anomalia foi detectada durante o ensaio.

O segundo teste, que foi conduzido com uma pressão maior, de 59 bar. Após atingir a pressão de ensaio, foram monitoradas a queda de pressão e a integridade do tubo para verificar possíveis falhas de vedação ou vazamentos. Novamente, não foi encontrado nenhum problema. A ABNT (2017) estabelece que durante os testes nenhum tipo de vazamento é tolerado. Esses resultados indicam que o tubo demonstrou resistência adequada sob condições de pressão testadas, confirmando sua capacidade de manter a integridade estrutural e funcionalidade em situações de uso prático. A ausência de anomalias nos testes reflete a qualidade do material, a eficácia dos processos de fabricação empregados e atendendo aos requisitos definidos pela ABNT (2017). A Figura 10 mostra o teste efetuado.

Figura 4.13 - Sistema montado e pressurizado no ensaio hidrostático.



Fonte: Autor (2024).

4.4. Ensaio de tração

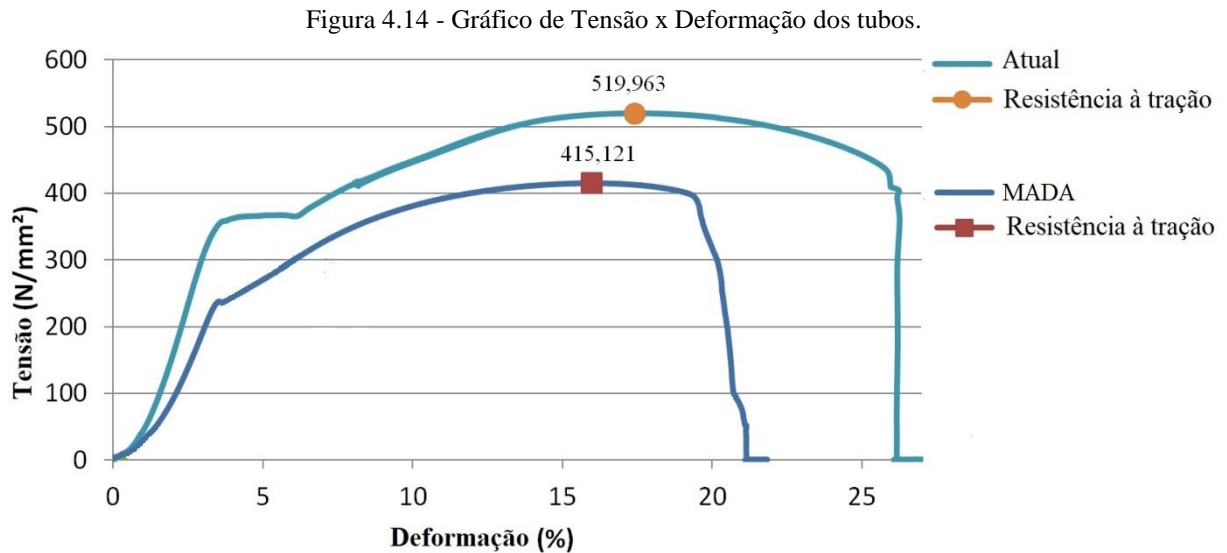
Os limites de escoamento, na Tabela 4.11, do material atual e do MADA foram muito próximos. Em relação ao limite de escoamento, a norma NBR 5590 estabelece um limite mínimo de 240 MPa para material de grau B.

Tabela 4.11 - Valores de limite de escoamento obtidos.

Amostra	Limite de escoamento (MPa)
Atual	365,731
MADA	364,858

Fonte: Autor (2024).

Por meio do ensaio de tração, foi possível obter os valores de resistência à tração e limite de escoamento dos tubos testados. A Figura 4.13 apresenta as curvas de tensão-deformação geradas e os valores máximos de tensão alcançados para as duas amostras.



Fonte: Autor (2024).

Comparando os valores de tensão máxima de cada tubo, a amostra atual obteve o maior valor, com 519,963 MPa, enquanto a amostra do tubo MADA alcançou 415,121 MPa. O alongamento e a tenacidade foram de 26,15% e 108,91 MJ/m³, respectivamente, para o tubo atual e de 21,84% e 61,96 MJ/m³, respectivamente, para o tubo MADA. Ao comparar o valor de resistência à tração do tubo MADA com a resistência declarada do próprio arame ER70S-6, conforme descrito por SUMIG (2019), constatou-se que o tubo fabricado por MADA apresentou um valor inferior, sendo que a resistência do arame é de 480 MPa ou maior. Justus e Senthilkumar (2023) encontraram valores próximos ao do tubo MADA para a resistência à tração em peças fabricadas por MADA com arame ER70S-6, variando entre 422 MPa e 460 MPa. De acordo com a NBR 5590, o valor mínimo aceito para uma amostra de grau B no teste de tração é 415 MPa.

4.5. Caracterização da microestrutura por microscopia óptica

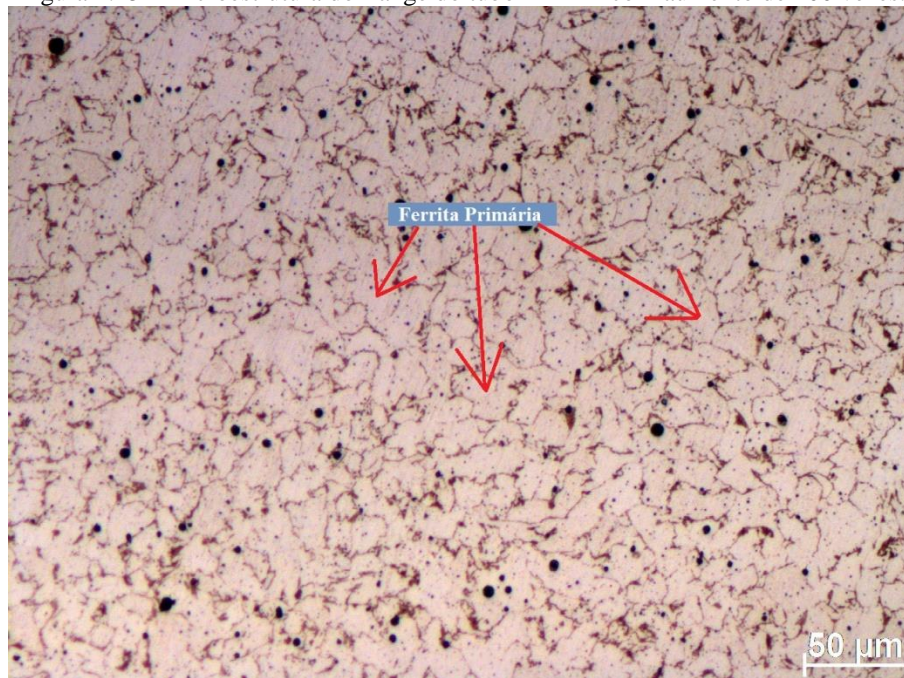
Na análise de microestruturas de aços de baixo carbono, a classificação proposta por Anelli e Di Nunzio (1996), amplamente aceita na comunidade europeia, se destaca como uma ferramenta essencial, especialmente no contexto de processos de soldagem e tratamentos térmicos complexos. Este esquema de classificação é valioso por permitir que se identifiquem

e avaliem as diferentes fases e características microestruturais de maneira sistemática, utilizando-se técnicas acessíveis como a microscopia óptica.

A importância deste método reside em sua capacidade de oferecer uma avaliação detalhada das microestruturas que emergem em aços submetidos a condições variadas de processamento térmico e mecânico, como ocorre com as peças produzidas por MADA. Durante a deposição das camadas, o controle e a compreensão das transformações microestruturais são importantes para garantir a integridade mecânica e a performance do material fabricado.

Adicionalmente, a microdureza está estreitamente relacionada aos constituintes de sua microestrutura, que determinam seu comportamento mecânico. Conforme cita Colpaert (2008), em aços, constituintes como ferrita e perlita influenciam diretamente a dureza e outras propriedades mecânicas. A ferrita, sendo mais dúctil, tem microdureza menor, enquanto a perlita, com suas lamelas de cementita, apresenta maior dureza. A Figura 4.15 destaca a microestrutura da amostra do flange do tubo MADA, sendo esta a primeira região a ser fabricada e, conseqüentemente, exposta a maiores variações de temperatura ao longo do processo de fabricação.

Figura 4.15 - Microestrutura do flange do tubo MADA com aumento de 200 vezes.

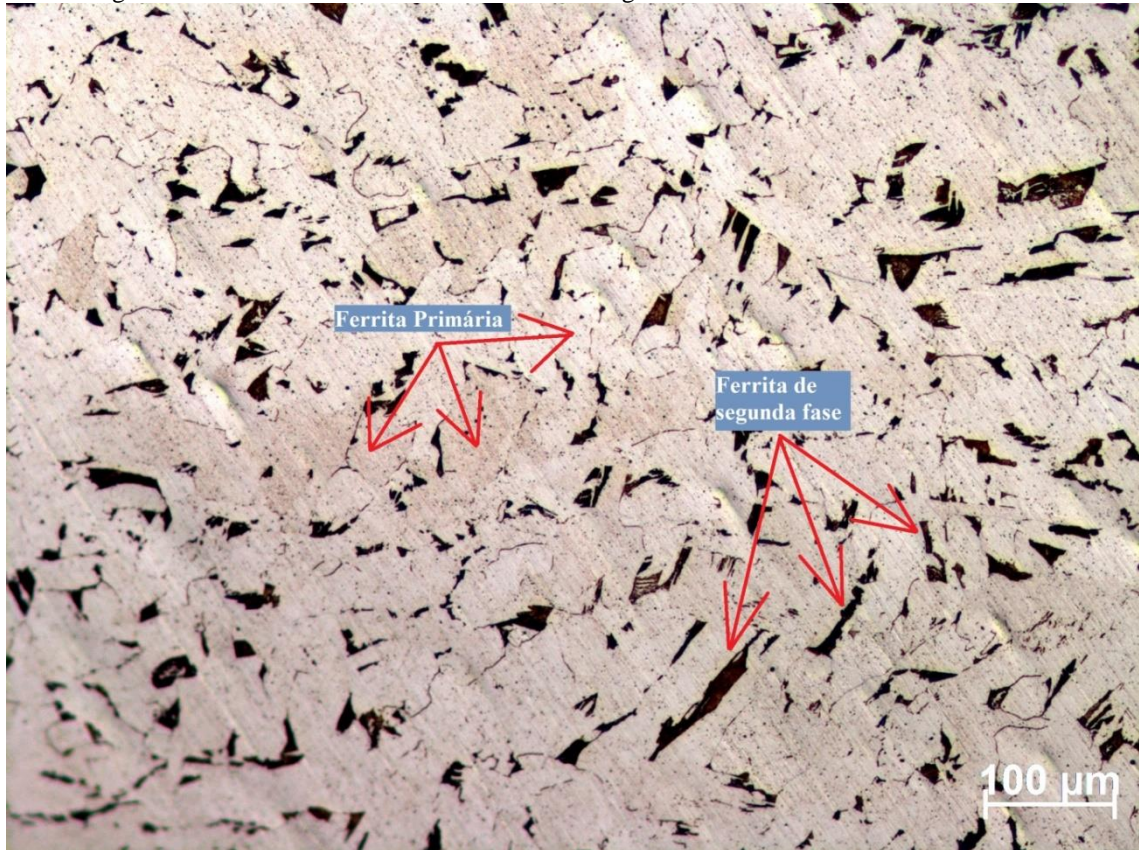


Fonte: Autor (2024).

Conforme visto na Figura 4.15, a estrutura é composta majoritariamente por ferrita primária, equiaxial, características de uma transformação por difusão (ferrita idiomorfa) e

finas lamelas de perlita. Le *et al.* (2020) encontraram uma estrutura similar para as camadas de deposição inferior, em aços de baixo carbono. A Figura 4.16 mostra a parte inferior do tubo MADA, fabricada logo após a fabricação do flange.

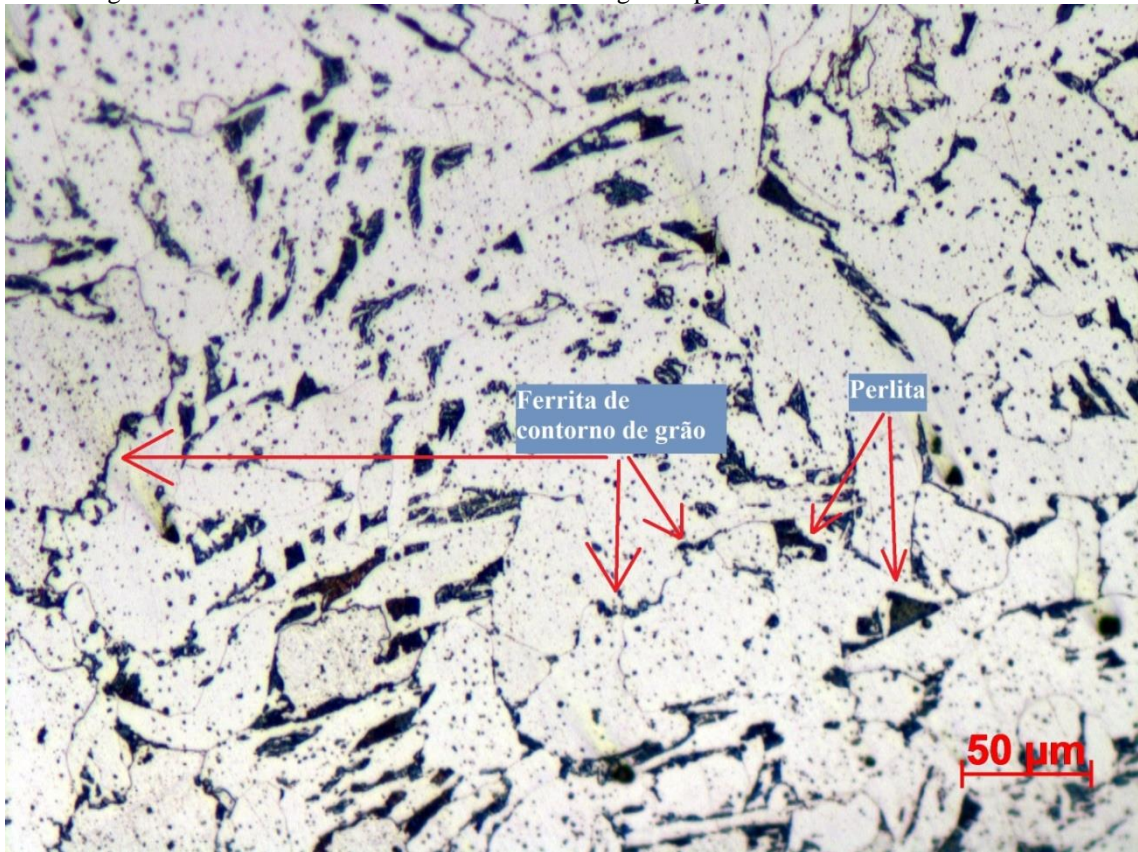
Figura 4.16- Microestrutura do tubo MADA na região inferior com aumento de 100 vezes.



Fonte: Autor (2024).

Pela Figura 4.16, é possível observar a formação de ferrita primária e de uma estrutura de coloração escura. Esta estrutura escura possui uma relação comprimento por largura maior que 4:1, e ainda, sendo algumas delas paralelas, característica de ferrita com segunda fase. Esta estrutura é similar a descrita por Colpaert (2008) e Anelli e Di Nunzio (1996), referente a microestrutura de aços soldados. A Figura 4.17 mostra a microestrutura da parte superior do tubo MADA.

Figura 4.17- Microestrutura do tubo MADA na região superior com aumento de 200 vezes.

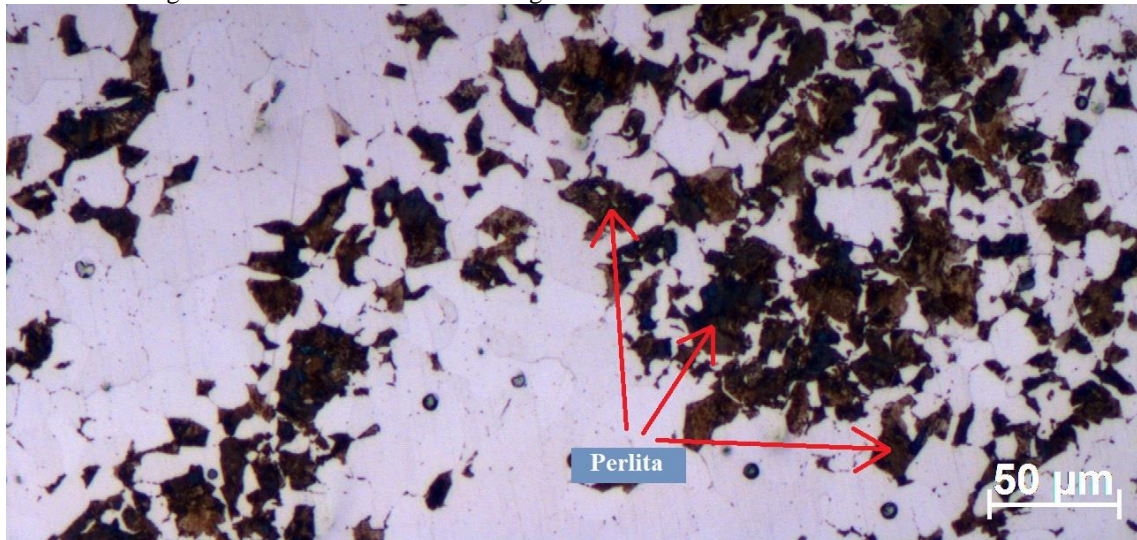


Fonte: Autor (2024).

Na Figura 4.17 é possível observar regiões com ferrita de contorno de grão e perlita. Le *et al.* (2020) e Nagasai *et al.* (2022) encontraram microestruturas similares para regiões superiores de amostras fabricadas por MADA, incluindo o aparecimento de ferrita de contorno de grão, similar ao mostrado na Figura 4.17.

As diferentes regiões da peça MADA apresentaram microestruturas distintas. Nas regiões inferiores, especialmente no flange MADA, predominou a estrutura de ferrita primária, enquanto nas regiões superiores observou-se o surgimento de outros constituintes, como ferrita com segunda fase e de contornos de grão, além de algumas áreas com grãos de perlita. A Figura 4.18 mostra a microestrutura do flange atual.

Figura 4.18 - Microestrutura do flange do tubo atual com aumento de 200 vezes.



Fonte: Autor (2024).

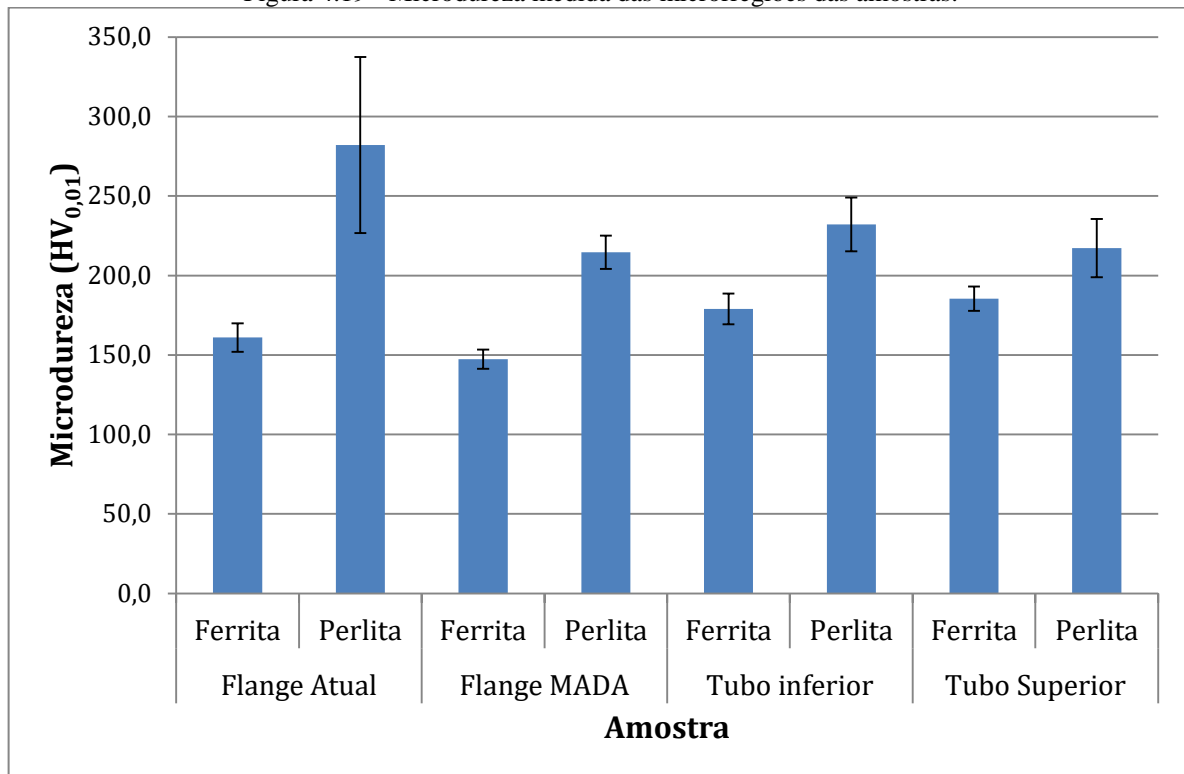
Na Figura 4.18, referente à amostra do flange atual, a microestrutura é composta predominantemente por grãos de ferrita e perlita, com uma proporção aproximadamente equitativa entre esses constituintes.

Ao comparar a microestrutura dos tubos MADA com a do tubo atual, observa-se uma diferença significativa, especialmente em termos de formação de perlita. O tubo atual exibiu uma maior quantidade de perlita, com grãos bem definidos e simétricos. Esse resultado é esperado, visto que o aço ASTM A106 grau B, utilizado no tubo atual, pode conter uma quantidade de carbono superior à do arame A5.18 ER70S-6, o que favorece a formação de perlita.

4.5.1. Microdureza das microestruturas e dureza das regiões

A medição da microdureza das fases foi realizada para entender como diferentes constituintes microestruturais, como ferrita, perlita influenciam as propriedades mecânicas. Cada constituinte tem uma dureza intrínseca que afeta o desempenho total do material, com a ferrita sendo mais dúctil e a perlita conferindo resistência ao desgaste. A Figura 4.19 mostra os valores medidos de microdureza dos constituintes das amostras.

Figura 4.19 - Microdureza medida das microrregiões das amostras.



Fonte: Autor (2024).

Pela Figura 4.19, é possível observar que o microconstituente perlita apresentou valores de microdureza superiores aos da ferrita. A perlita do flange atual exibiu os maiores valores de microdureza entre todas as amostras de perlita. O flange MADA registrou os menores valores de microdureza, tanto para a perlita quanto para a ferrita. A Tabela 4.12 apresenta os valores medidos de microdureza e suas respectivas incertezas.

Tabela 4.12 – Valores de microdureza medidos.

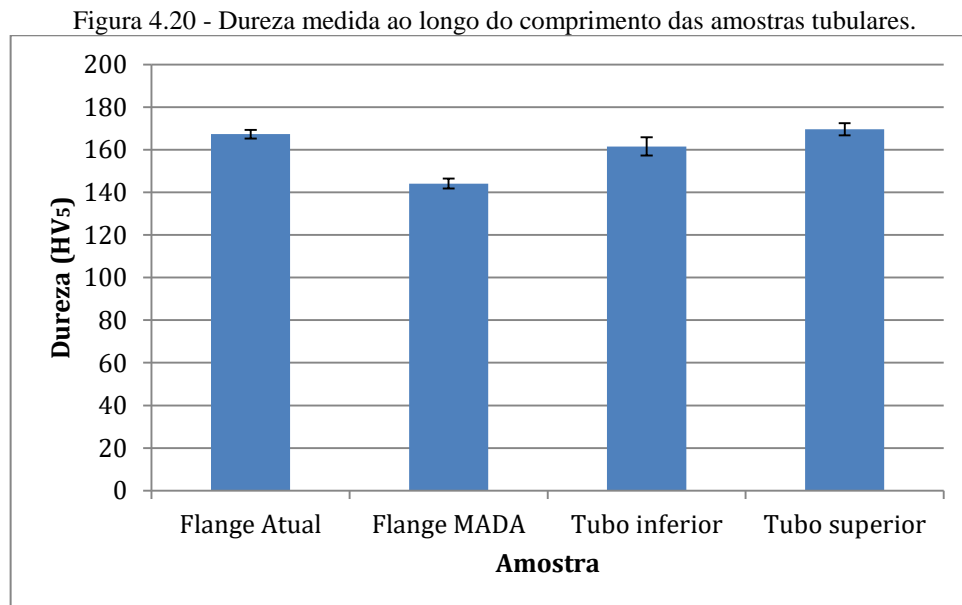
Região da Amostra	Fase / microconstituente	Microdureza (HV _{0,01})
Flange Atual	Ferrita	161,0 ± 8,9
	Perlita	282,1 ± 55,4
Flange MADA	Ferrita	147,3 ± 6,1
	Perlita	214,6 ± 10,4
Tubo inferior	Ferrita	179,0 ± 9,6
	Perlita	232,1 ± 16,9
Tubo Superior	Ferrita	185,4 ± 7,6
	Perlita	217,2 ± 18,3

Fonte: Autor (2024).

Para o flange MADA, os valores de microdureza estão menores, quando comparados aos das outras regiões. Com relação as regiões do Tubo inferior e superior, os valores de

microdureza da ferrita estão próximos. Umemoto *et al.* (2001) encontraram valores próximos para a ferrita, na faixa de 180 HV. Capirova *et al.* (2012) também mediram valores próximos a estes para a ferrita. Para a perlita, Chen *et al.* identificaram valores entre 240 HV e 263 HV, que estão um pouco superiores, mas próximos aos valores medidos para as amostras tubulares.

Em termos de dureza das regiões inferiores e superiores de fabricação e do tubo atual, a Figura 4.20 mostra o gráfico de barra dos valores medidos.



Fonte: Autor (2024).

A ANOVA revelou que o flange MADA, tubo inferior e tubo superior possuem dureza estatisticamente diferentes, apesar do valor próximo de dureza entre o tubo inferior e superior, sendo o tubo superior com a dureza pouco maior que do inferior. A dureza do flange Atual é próxima a das regiões das amostras tubulares, e maior do que a apresentada pelo flange MADA.

Tabela 4.13 - Dureza das regiões das amostras.

Amostra	Dureza (HV ₅)
Flange Atual	167,3 ± 2,0
Flange MADA	144,1 ± 2,3
Tubo Inferior	161,5 ± 4,3
Tubo Superior	169,6 ± 2,8

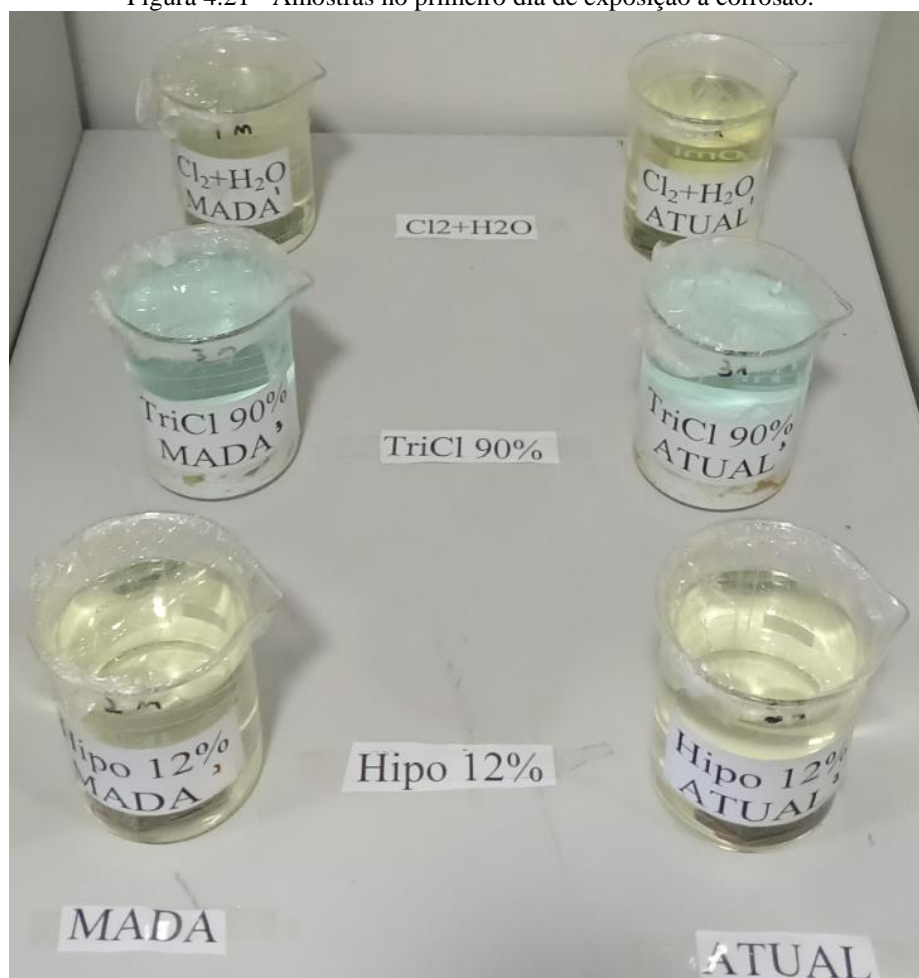
Fonte: Autor (2024).

A dureza das amostras foi menor nas regiões inferiores, correspondente ao flange e depois ao tubo inferior e aumentou nas regiões superiores, correspondente ao tubo superior. Ao correlacionar com a microestrutura, observa-se que a região do flange MADA é composta majoritariamente por ferrita, que possui uma microdureza menor em comparação com outros constituintes. Em contrapartida, outras regiões, bem como o flange atual, contêm uma maior quantidade de perlita e outros constituintes de maior microdureza que a ferrita, o que resulta em uma dureza mais elevada nessas áreas em comparação ao flange MADA. Chen *et al.* (2013) encontraram resultados similares, sendo que em regiões inferiores a dureza encontrada foi na faixa de 156 HV e em regiões superiores, na faixa de 166 HV, para fabricação MADA com arame ER70S-6. Le *et al.* (2020) também encontraram uma proporção similar para amostras fabricadas por MADA com aços baixo carbono, com regiões inferiores apresentando dureza na faixa de 175 HV e superiores, 185 HV.

4.6. Ensaio de corrosão em laboratório

No ensaio de corrosão efetuado em laboratório, com condições de temperatura controlada e meio corrosivo definido, as soluções não mostraram nenhuma mudança de cor imediata. O único efeito observado foi a efervescência na solução de cloro e água destilada, que ocorreu tanto nas amostras MADA quanto nas amostras Atuais. Essa efervescência é característica quando há alta concentração de ácido clorídrico em contato com o aço. A Figura 4.21 mostra as amostras no primeiro dia de exposição.

Figura 4.21 - Amostras no primeiro dia de exposição à corrosão.



Fonte: Autor (2024).

Ao longo dos dias, a cor das soluções mudou gradualmente, e a deposição de sólidos no fundo do recipiente de vidro também se alterou. A amostra nas soluções de cloro e água destilada permaneceu quase inalterada, sem sólidos depositados ou mudança significativa de cor, embora a efervescência continuasse. No entanto, a amostra nas soluções de tricloro e hipoclorito de sódio apresentou um alto teor de sólidos depositados, mas sem sinais visuais de efervescência nas amostras.

Após 7 dias, as soluções não apresentaram grandes mudanças na coloração ou deposição de sólidos, mantendo uma aparência semelhante à observada no controle de 5 dias. Ferreira (2015) encontrou aparências similares em amostras de aço inox expostas a hipoclorito de sódio em várias titulações, apresentando a variação na coloração e alguma deposição no fundo dos frascos. As amostras foram então removidas e lavadas com água destilada, sem o uso de materiais abrasivos que pudessem causar desgaste ou transferência de

materiais, como lixa. As amostras foram deixadas para secar em temperatura ambiente por 1 dia. A Figura 4.22 mostra o resultado da corrosão após 1 semana de ensaio.

Figura 4.22 - Amostras fora da solução corrosiva após 7 dias de exposição.



Fonte: Autor (2024).

Todas as amostras mostraram corrosão visual significativa. As amostras na solução de hipoclorito de sódio formaram uma camada superficial escura de óxidos e hidróxidos de ferro, com pontos de corrosão mais localizados, sendo condições similares encontradas por Ferreira (2015). Em contraste, as amostras na solução de cloro e água destilada apresentaram corrosão mais uniforme. A Tabela 4.14 exhibe os resultados para as amostras do tubo MADA.

Tabela 4.14 - Corrosão em massa: MADA.

Tag da amostra	Agente corrosivo	Perda de massa	Taxa de corrosão (mm/ano)
1Cl+H2O MADA	400g Cloro diluído em 1000 ml de água destilada	8,71%	11,09
2Hipo 12% MADA	Hipoclorito de sódio 12%	3,00%	3,62
3TriCl 90% MADA	Tricloro-S-Triazina-Triona 90%	7,72%	9.67

Fonte: Autor (2024).

A análise de perda de massa revelou que a amostra MADA experimentou a maior perda de massa na solução de cloro e água destilada, seguida pela solução de tricloro, com a menor perda de massa na solução de hipoclorito de sódio. A Tabela 4.15 exibe os resultados para as amostras do tubo Atual.

Tabela 4.15 - Corrosão em massa: Atual.

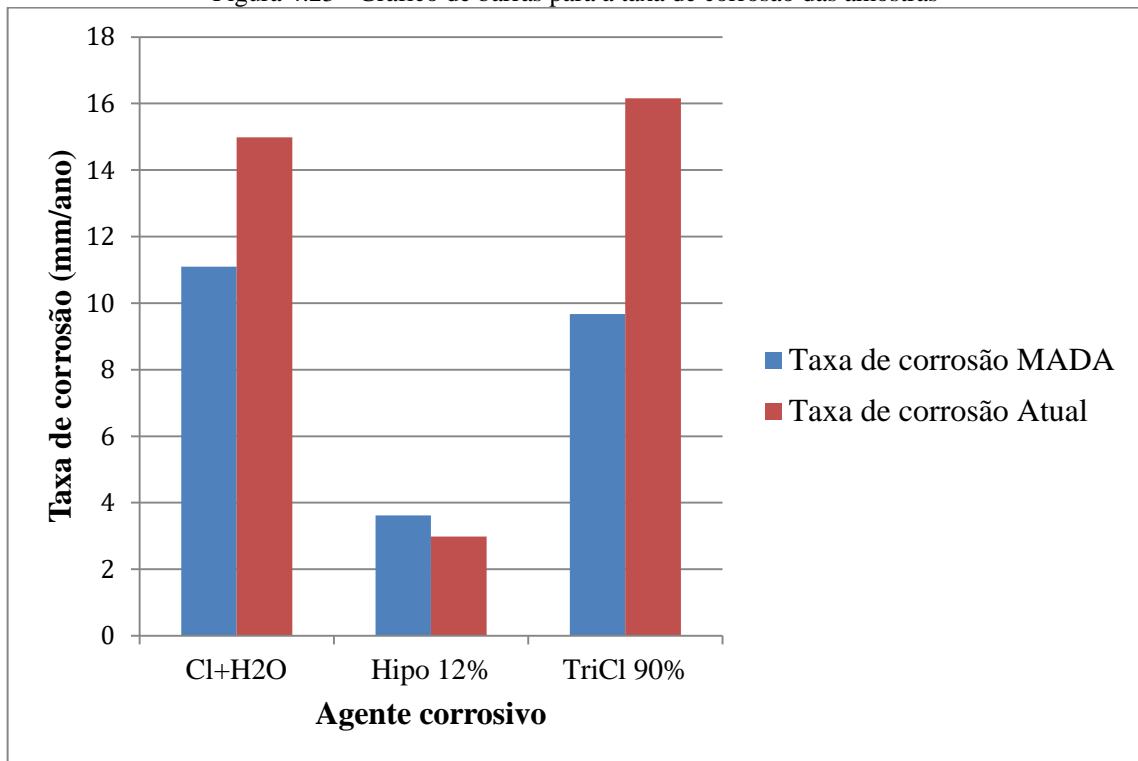
Tag da amostra	Agente corrosivo	Perda de massa	Taxa de corrosão (mm/ano)
1Cl+H2O Atual	400g Cloro diluído em 1000 ml de água destilada	12,30%	14,98
2Hipo 12% Atual	Hipoclorito de sódio 12%	2,46%	2,99
3TriCl 90% Atual	Tricloro-S-Triazina-Triona 90%	12,90%	16,16

Fonte: Autor (2024).

Desta vez, a amostra na solução de tricloro apresentou a maior perda de massa devido à corrosão, seguida pela amostra na solução de cloro e água destilada. Em comparação com o material MADA, é evidente que o material Atual apresentou uma maior perda de massa, indicando que o material MADA demonstra uma resistência à corrosão superior quando submetido a soluções de tricloro e cloro misturadas com água destilada. Já quando exposto a solução de hipoclorito de sódio, o material MADA apresentou um desempenho levemente inferior ao material Atual.

A ASM (2003) destaca que a taxa de corrosão dos aços carbono quando expostos ao cloro úmido pode chegar até a 40 mm/ano em baixas temperaturas. Renzo (1985) fez a avaliação de taxa de corrosão de aços em soluções cloradas, com diferentes concentrações e chegou a valores de 0,5 mm/ano em soluções de menor concentração até valores de 10 mm/ano, em soluções com concentração de 500 mg/l de cloretos. Os valores encontrados estão seguindo a tendência encontrada pela referência, com aumento da taxa de corrosão com o aumento de concentração de subprodutos do cloro. A Figura 4.23 resume os dados de taxa de corrosão para o tubo MADA e atual.

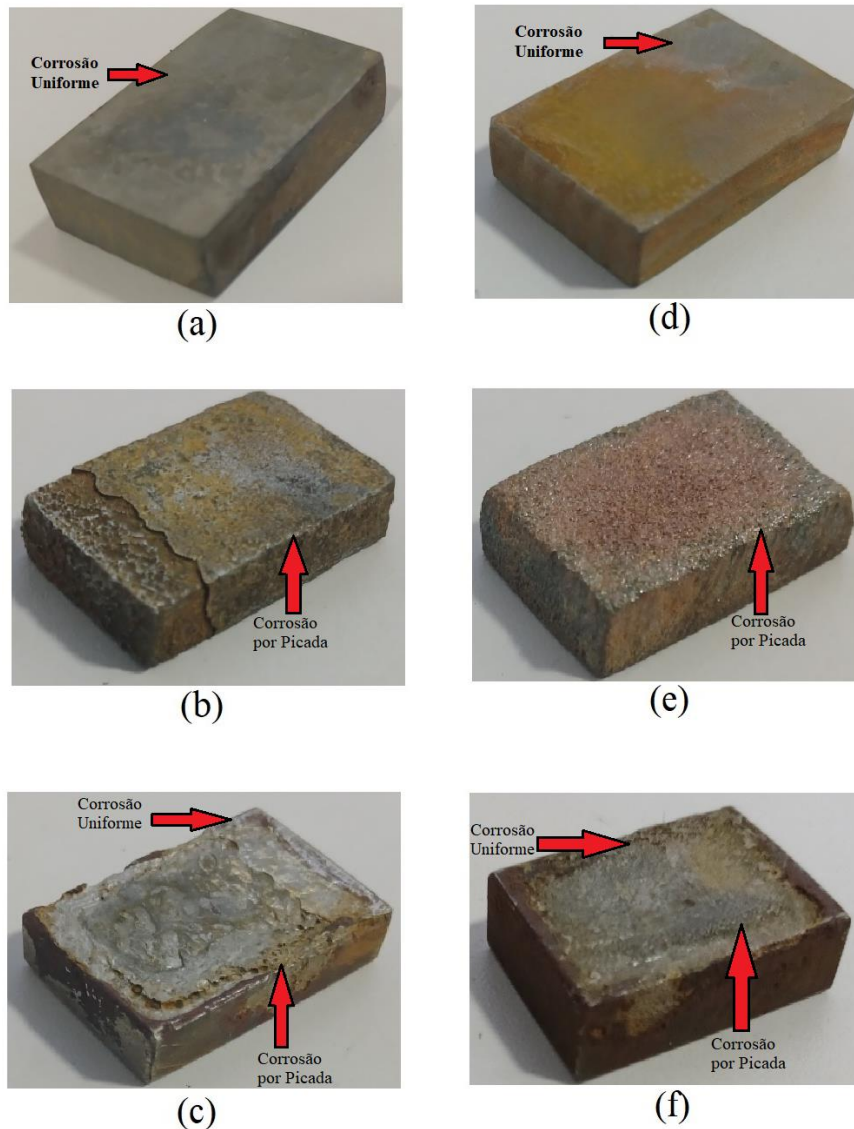
Figura 4.23 - Gráfico de barras para a taxa de corrosão das amostras



Fonte: Autor (2024).

Em termos de mecanismos de corrosão, a Figura 4.24 destaca as amostras lavadas após o término do ensaio de corrosão em laboratório.

Figura 4.24 - Amostras após o ensaio de corrosão em laboratório: (a) MADA em Cl_2 e água; (b) MADA em Hipoclorito de sódio; (c) MADA em tricloro; (d) Atual em Cl_2 e água; (e) Atual em Hipoclorito de sódio; (f) Atual em tricloro.



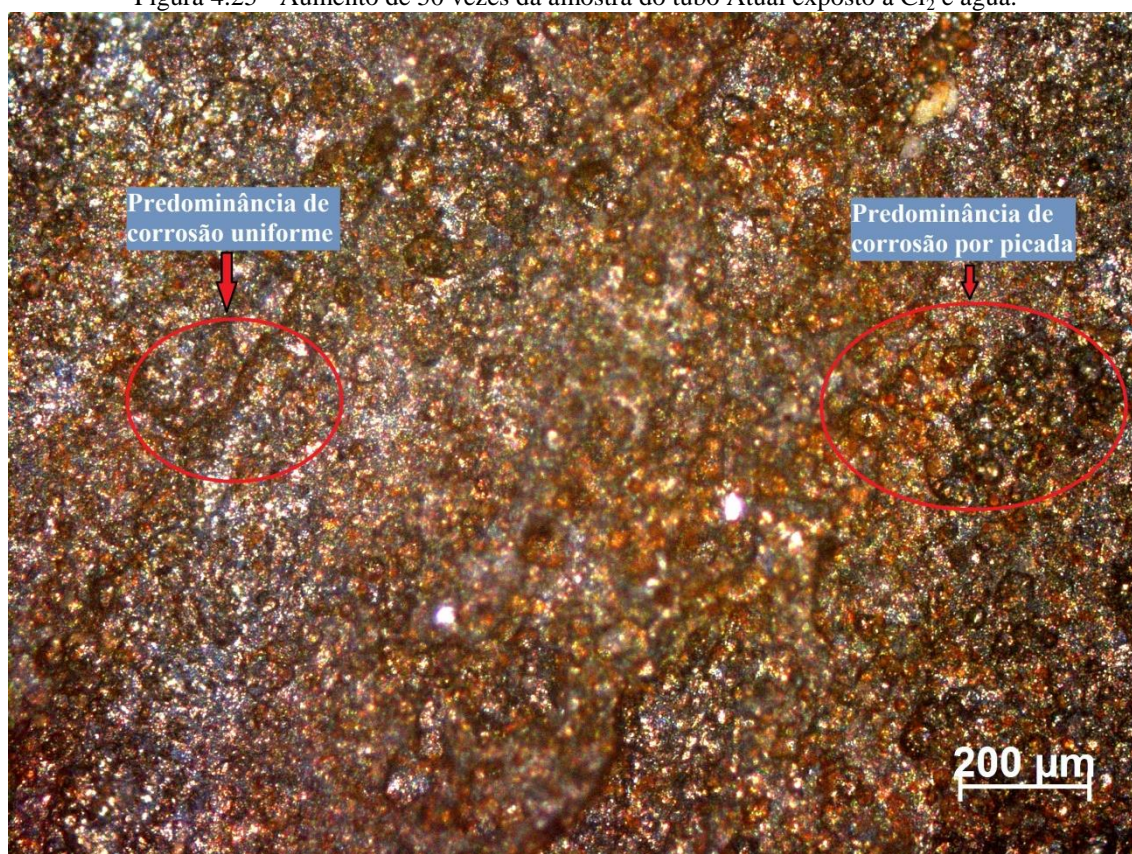
Fonte: Autor (2024).

Pela Figura 4.24, é possível observar os mecanismos de corrosão predominantes para cada meio. De maneira geral, as amostras MADA e Atual sofreram mecanismos de corrosão similares, de acordo com cada meio corrosivo. Na Figura 4.24 (a) e Figura 4.24 (d), referente a solução de Cl_2 e água, a corrosão predominante é a uniforme, com poucos pontos de corrosão concentrada ou corrosão por *pites*. Na Figura 4.24 (b) e Figura 4.24 (e), referente a solução de tricloro, a corrosão predominante é a por *pites*, sendo possível observar o início de formação de grandes poros nas amostras. Já na Figura 4.24 (c) e Figura 4.24 (f), referente a solução de hipoclorito de sódio, ocorre um ataque corrosivo misto, contudo com maior predominância da corrosão uniforme. Kreysa e Schutze (2005) afirmam que uma corrosão

uniforme é preferível, pois mecanismos de corrosão concentrados, como o caso da corrosão puntiforme, são difíceis de serem detectados em componentes já instalados e podem levar a rompimentos catastróficos e repentinos.

As amostras corroídas ainda foram observadas em microscópio óptico, com aumento de 50 vezes. A Figura 4.25 mostra o resultado da observação para o tubo Atual exposto à Cl_2 e água.

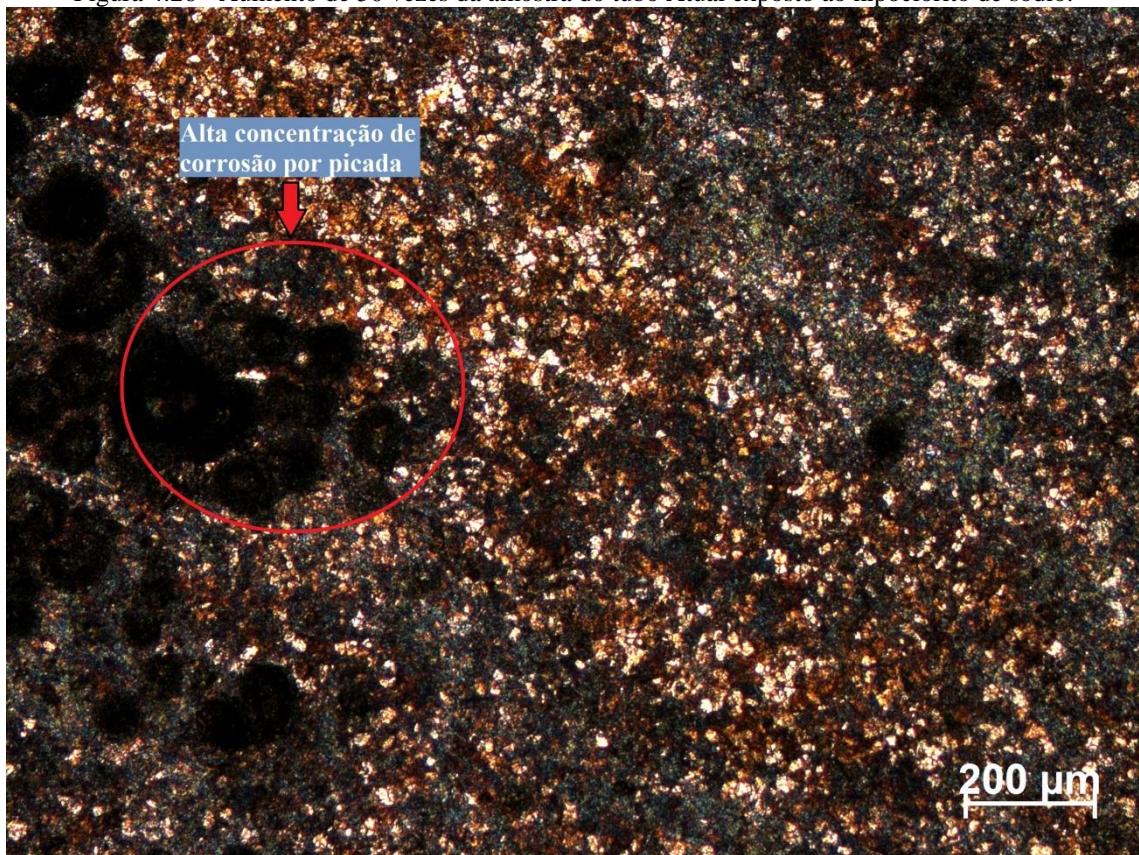
Figura 4.25 - Aumento de 50 vezes da amostra do tubo Atual exposto à Cl_2 e água.



Fonte: Autor (2024).

Ao amostra do tubo atual exposto a Cl_2 e água, confirmou-se que o mecanismo de corrosão predominante foi a corrosão uniforme. Contudo, foi possível identificar algumas regiões específicas com corrosão por puntiforme, conforme destacado na Figura 4.25. Na amostra de tubo Atual exposto ao hipoclorito de sódio, a Figura 4.26 mostra os achados.

Figura 4.26 - Aumento de 50 vezes da amostra do tubo Atual exposto ao hipoclorito de sódio.

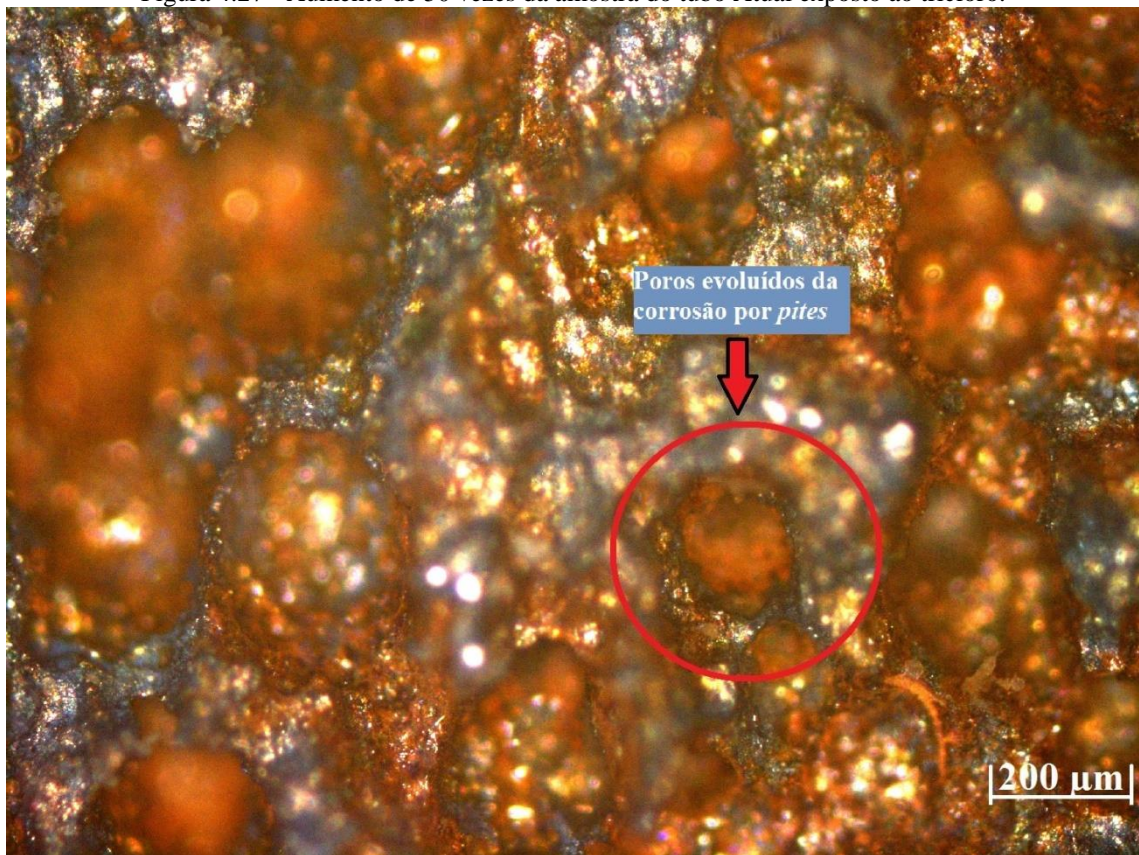


Fonte: Autor (2024).

Conforme visto na Figura 4.26, há uma grande predominância de corrosão uniforme, mas também é possível observar regiões com alta concentração de corrosão por *pites*. A observação no microscópio óptico confirmou um ataque corrosivo misto, com áreas apresentando tanto corrosão por *pites* quanto corrosão uniforme.

Abordando o tubo Atual exposto a solução corrosiva de tricloro, a Figura 4.27 destaca a superfície atacada.

Figura 4.27 - Aumento de 50 vezes da amostra do tubo Atual exposto ao tricloro.

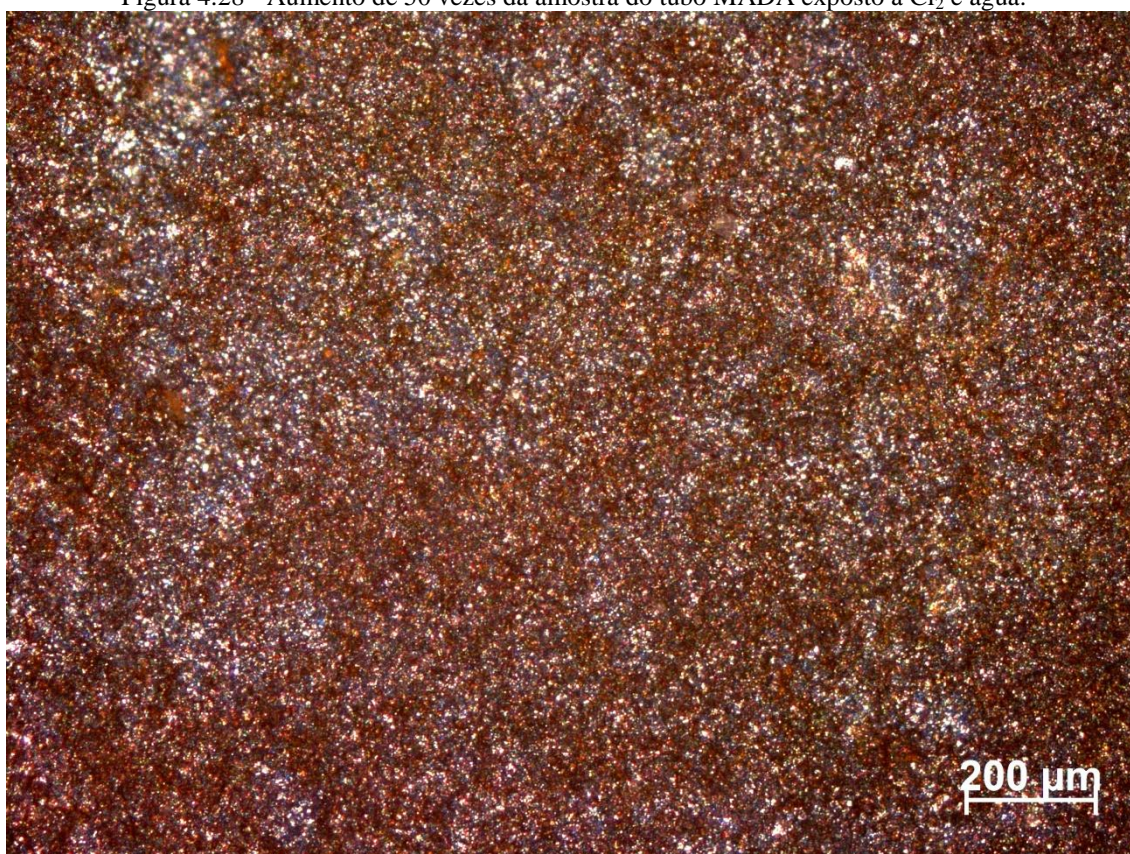


Fonte: Autor (2024).

Observando a Figura 4.27, é possível notar a grande quantidade de corrosão por *pites*, com evolução para poros de maior diâmetro e profundidade. Toda a superfície da amostra sofreu corrosão por alveolar, sendo este o mecanismo de corrosão predominante nesse caso.

Para as amostras de tubo MADA, a Figura 4.28 destaca a superfície corroída por Cl_2 e água.

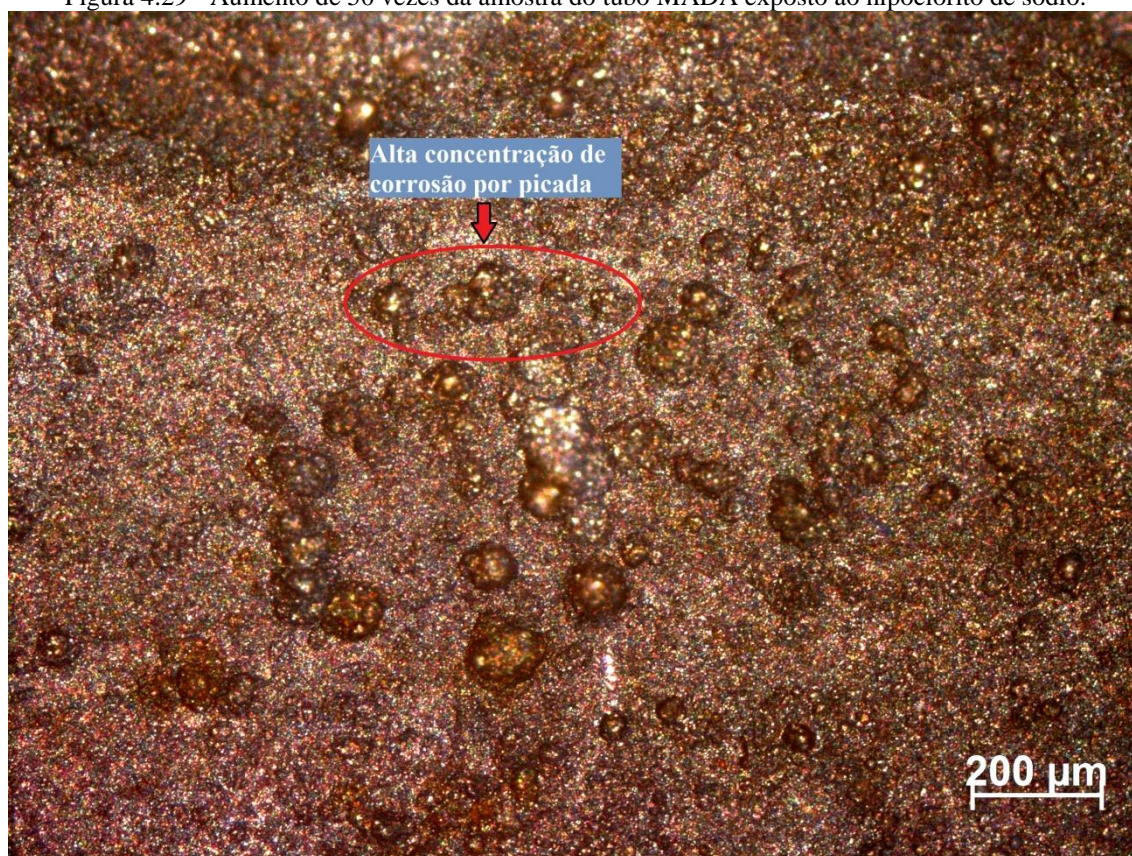
Figura 4.28 - Aumento de 50 vezes da amostra do tubo MADA exposto à Cl_2 e água.



Fonte: Autor (2024).

A Figura 4.28 mostra uma região de corrosão uniforme, que foi predominante na superfície da amostra. Não foram identificadas regiões com concentração de corrosão alveolar, diferentemente da amostra do tubo atual que exibiu algumas poucas áreas com esse tipo de corrosão. Para a amostra exposta a hipoclorito de sódio, a Figura 4.29 mostra os resultados da observação no microscópio óptico.

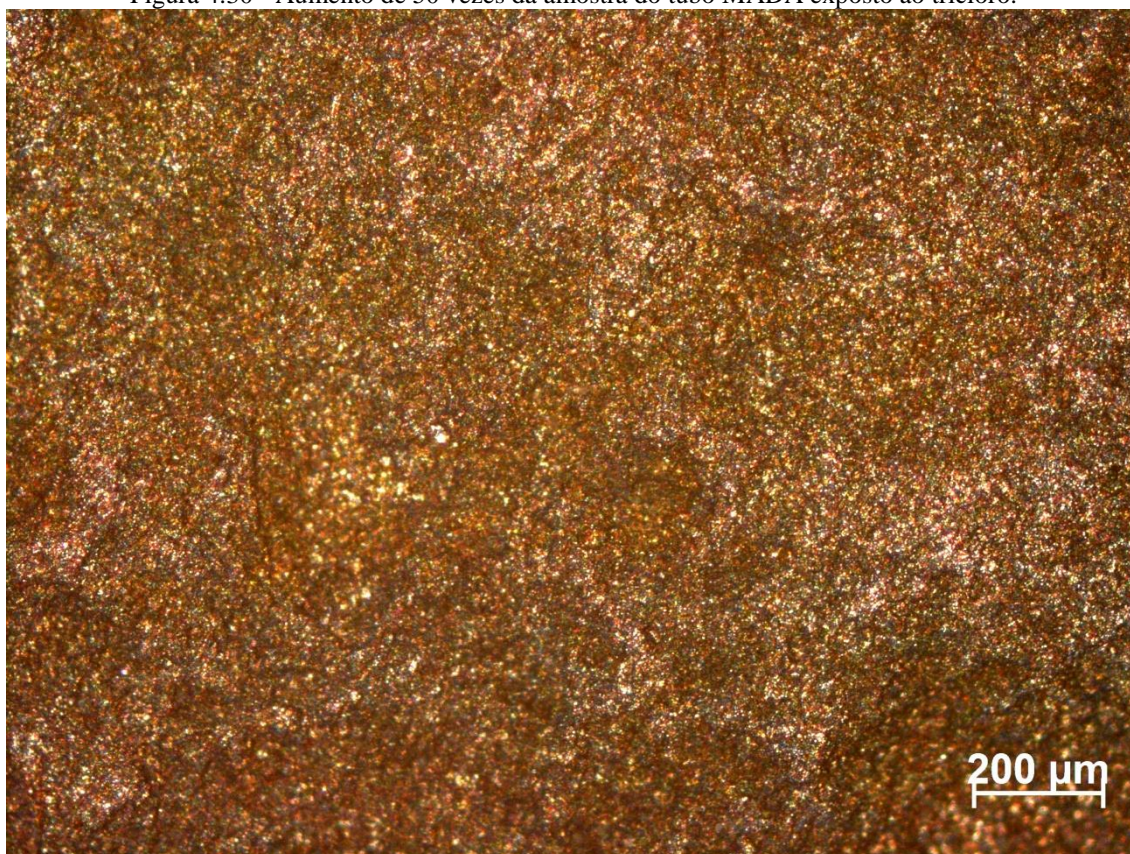
Figura 4.29 - Aumento de 50 vezes da amostra do tubo MADA exposto ao hipoclorito de sódio.



Fonte: Autor (2024).

Conforme visto na Figura 4.29 e similar ao encontrado na amostra de tubo Atual, o mecanismo de corrosão foi misto, com algumas regiões com ataque uniforme, sendo este predominante, e outras regiões com corrosão alveolar. Para a amostra MADA exposta ao tricloro, a Figura 4.30 destaca uma região da superfície corroída.

Figura 4.30 - Aumento de 50 vezes da amostra do tubo MADA exposto ao tricloro.



Fonte: Autor (2024).

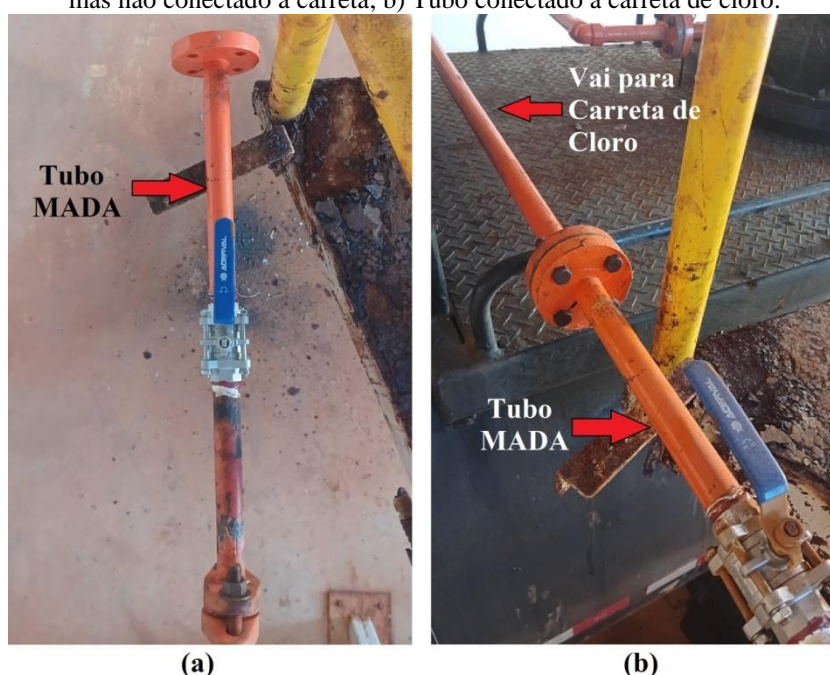
Na amostra MADA exposta ao tricloro, foi observado duas regiões distintas. Uma região com alta concentração de corrosão uniforme, conforme visto na Figura 4.30 e outra região com grande quantidade de corrosão puntiforme, caracterizando uma corrosão mista.

As amostras de tubo MADA apresentaram resultados semelhantes, em termos de mecanismos de corrosão predominantes, aos observados nas amostras de tubo Atual, sendo que as amostras de tubo Atual apresentaram maior propensão à corrosão alveolar em todos os meios corrosivos, principalmente quando exposto ao tricloro. Ferreira (2015) encontrou resultados similares em aços inoxidáveis expostos a hipoclorito de sódio em diversas concentrações, sendo a corrosão por alveolar o principal mecanismo de corrosão identificado. No estudo de Qi *et al.* (2022), sobre os efeitos da corrosão de tubos de ferro fundido em meio de solução clorada, observou-se que as amostras expostas ao cloro sofreram uma corrosão que resultou em uma superfície mais lisa, enquanto os subprodutos formados geraram uma superfície de corrosão mais áspera. Wang *et al.* (2022) identificaram morfologias distintas em aços expostos a ambientes com diferentes concentrações de íons Cl^- . Com o aumento da concentração desses íons, o ataque corrosivo foi intensificado, resultando, inclusive, no surgimento de corrosão por picada.

4.7. Ensaio de corrosão em serviço

O tubo fabricado por MADA foi instalado no prédio de cloro da Estação de Tratamento de Água Mauro Borges, após aprovação no ensaio hidrostático. A conexão do tubo MADA é parte do sistema de tubulação que fornece cloro líquido, conforme ilustrado na Figura 4.31.

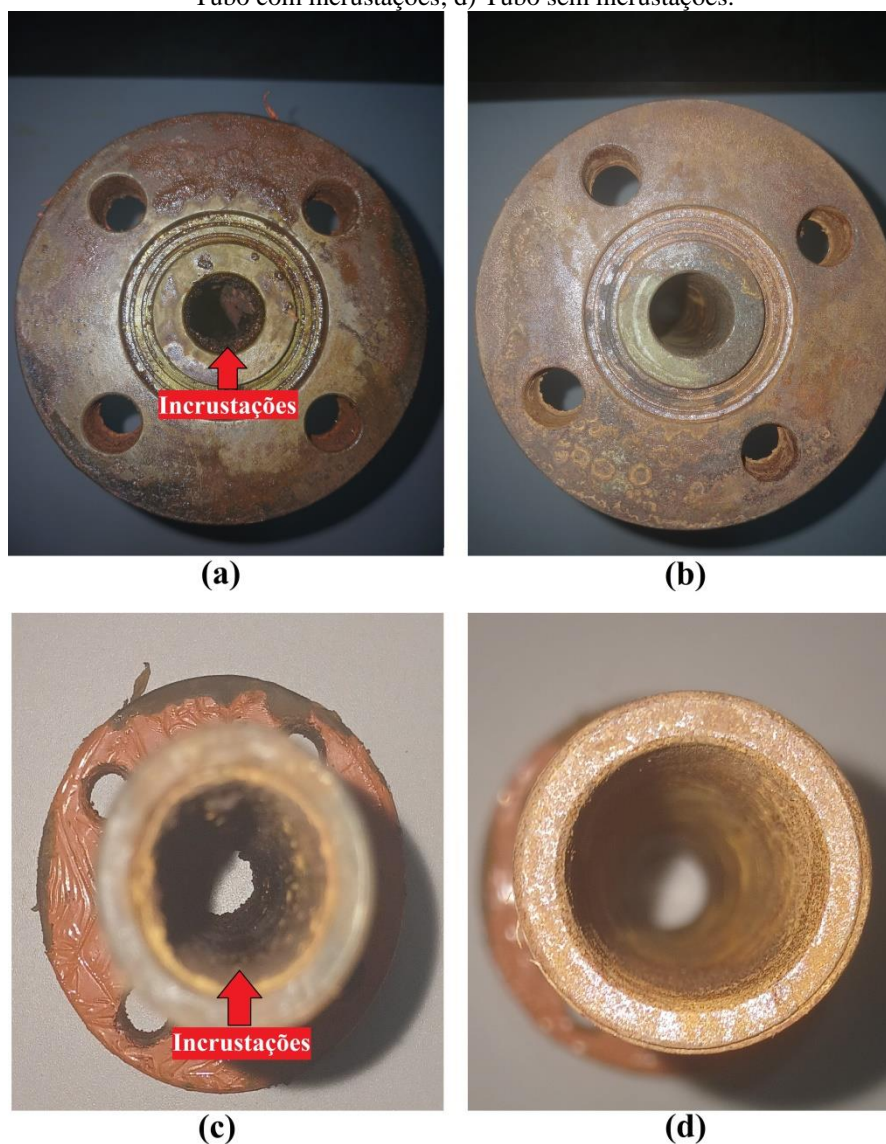
Figura 4.31 - Instalação do tubo MADA no sistema de transporte de cloro: a) tubo conectado ao sistema de cloro mas não conectado à carreta; b) Tubo conectado à carreta de cloro.



Fonte: Autor (2024).

O tubo foi instalado no local e mantido com fornecimento contínuo de cloro, uma vez que a produção de água na estação opera ininterruptamente, exceto durante paradas programadas. Durante o período de ensaio, o tubo foi constantemente monitorado para identificar possíveis vazamentos e outras anomalias. A vazão total de cloro, em toneladas, também foi registrada, sendo um dado já coletado pela empresa. O tubo permaneceu instalado por 102 dias, e nesse período não foram identificadas quaisquer anomalias. A Figura 4.32 mostra o tubo MADA imediatamente após ser retirado, com muitas incrustações devido a corrosão, e o tubo com as incrustações removidas.

Figura 4.32 - Tubo MADA após ensaio de corrosão: a) Flange com incrustações; b) Flange sem incrustações; c) Tubo com incrustações; d) Tubo sem incrustações.



Fonte: Autor (2024).

Após ser retirado, o tubo MADA apresentava muitas incrustações em sua parte interna, conforme destacado pelas Figura 4.32 (a) e (c). O tubo foi lavado para remoção das incrustações e, em seguida, secado com ar pressurizado, para então serem realizadas as medições de massa e espessura. Em uma inspeção visual, o tubo apresentou majoritariamente corrosão uniforme. A Tabela 4.16 apresenta os valores de taxa de corrosão calculados.

Tabela 4.16 - Taxa de corrosão das amostras tubulares.

Amostra	Taxa de corrosão (mm/ano)	Relação taxa de corrosão pela tonelada de vazão de cloro [mm/(ano·t _{cloro})]
Tubo MADA	0,70	0,0099
Tubo Atual	2,02	0,0349

Fonte: Autor (2024).

O tubo MADA apresentou uma taxa de corrosão menor em comparação com o tubo atual, sendo aproximadamente 2,89 vezes menor, conforme visto na Tabela 4.16. Essa diferença nas taxas de corrosão entre os tubos é ainda mais pronunciada quando se considera a vazão de cloro durante o período de ensaio, com a vazão do tubo atual sendo maior à do tubo MADA. Craig e Anderson (1995) destacam uma taxa de corrosão de até 1,83 mm/ano para aços expostos a cloro úmido. Kreysa e Schutze (2005) destacam que taxas de corrosão acima de 1 mm/ano já são comprometedoras e em muitos casos o material que possui taxas acima a esta são considerados inadequados.

No ensaio de corrosão em serviço, os valores de taxa de corrosão do tubo MADA foram ainda menores em comparação com o tubo atual, do que os observados no ensaio de corrosão em laboratório. No ensaio laboratorial, o tubo MADA apresentou uma taxa de corrosão 1,35 vezes menor que o tubo atual na solução de $\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O}$ e 1,67 vezes menor na solução de Tricloro. Em termos de perda de espessura, a Tabela 4.17 mostra os valores antes e depois do ensaio para o tubo MADA.

Tabela 4.17 - Variação de espessura do Tubo MADA.

	Espessura MADA Antes (mm)	Espessura MADA Depois (mm)	Perda de Espessura (mm)	Localização no eixo Z (mm)
	6,49	6,31	0,18	270
	6,6	6,32	0,28	200
	6,76	6,54	0,22	130
	6,65	6,46	0,19	50
	6,64	6,39	0,25	0
Média	6,62	6,40	0,22	
Desvio Padrão	0,09	0,10	0,04	

Fonte: Autor (2024).

O Tubo MADA teve uma perda de espessura relativamente uniforme ao longo do seu eixo Z, apresentando uma perda mais alta nos pontos localizados a 200 mm e 0 mm. O menor

valor ocorreu no ponto 270 mm. Para o tubo atual, a Tabela 4.18 mostra os valores de perda de espessura.

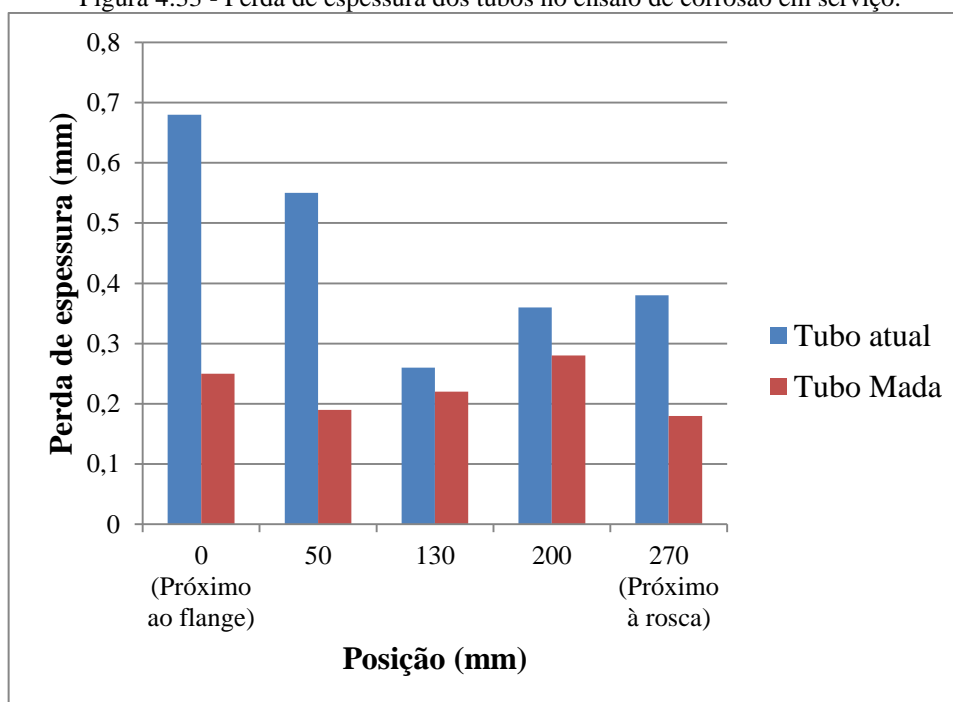
Tabela 4.18 - Variação de espessura do Tubo Atual.

	Espessura Tubo Atual antes (mm)	Espessura Tubo Atual depois (mm)	Perda de Espessura (mm)	Localização no eixo Z (mm)
	5,57	5,19	0,38	270
	5,61	5,25	0,36	200
	6,04	5,78	0,26	130
	5,78	5,23	0,55	50
	5,87	5,19	0,68	0
Média	5,77	5,33	0,45	
Desvio Padrão	0,19	0,25	0,17	

Fonte: Autor (2024).

O resultado comparativo de perda de espessura entre o tubo atual e o tubo MADA é mostrado na Figura 4.33.

Figura 4.33 - Perda de espessura dos tubos no ensaio de corrosão em serviço.



Fonte: Autor (2024).

Para o tubo atual, houve uma variação mais significativa na perda de espessura ao longo do eixo Z, com perdas mais acentuadas nos pontos localizados a 0 mm e a 50 mm ao longo do comprimento do tubo, enquanto a menor perda de espessura foi observada a 130 mm. Li *et al.* (2022) encontraram diferentes valores de taxa de corrosão em dois aços de composição distinta expostos a ambientes com cloro e ácidos fortes. O aço com menor porcentagem de elementos de liga, como manganês, silício, cobre e cromo, exibiu uma taxa de corrosão de até 27 mm/ano, enquanto o aço com maior quantidade desses elementos de liga apresentou uma taxa de corrosão de 2 mm/ano. Por outro lado, Rocha (2021) observou uma forte corrosão por picada em componentes de Monel expostos ao cloro úmido. Nesse material, também foram identificadas taxas de corrosão elevadas, chegando a 24 mm/ano.

Comparado ao tubo MADA, o tubo atual apresentou uma média maior de perda de espessura, além de uma distribuição de perda menos uniforme. Nos pontos iniciais, próximos ao flange do tubo, a perda de espessura foi mais severa no tubo atual. O tubo MADA também mostrou maior perda no ponto mais próximo ao flange, o que já era esperado em ambos os casos, pois essa é a região de conexão inicial do tubo e está mais exposta à umidade.

5. CONCLUSÕES

Após a realização dos ensaios e avaliação dos resultados obtidos, é possível concluir que:

- Em relação à parametrização para a fabricação do tubo MADA, valores de vazão de gás próximos a 20 l/min resultaram em uma superfície de deposição com grande quantidade de poros. Vazões maiores proporcionaram uma camada de deposição com melhor acabamento. O espaçamento fixo entre os círculos também influencia a geometria da face do flange, sendo que o valor de 6 mm resulta em uma face ovalizada, enquanto o valor de 12 mm leva à formação de vazios na face, sendo o valor de 9 mm adequado para obtenção de uma face retilínea.
- Com respeito aos aspectos de pós-processamento da peça MADA, a força de usinagem apresentou a proporção esperada conforme a dureza de cada material e o avanço utilizado. O tubo MADA apresentou uma força de usinagem RMS levemente inferior à do tubo comercial. No entanto, o tubo MADA registrou um maior valor de pico e maior dispersão da força, o que pode resultar em maior desgaste da ferramenta. Quanto à rugosidade, ambos os tubos apresentaram valores estatisticamente iguais, com classificação N9 de acordo com a norma ISO 1302 (2002).
- Os ensaios hidrostáticos realizados não apresentaram vazamentos, garantindo a estanqueidade do tubo MADA. O material MADA demonstrou um limite de escoamento e uma resistência à tração compatíveis com o material grau B, de acordo com a NBR 5590(2017), indicando que suas propriedades mecânicas são adequadas para aplicações conforme as pressões específicas de projeto.
- A microestrutura do tubo MADA apresentou uma composição com predominância de grãos bem definidos de ferrita nas regiões inferiores e de ferrita e perlita nas regiões superiores, inclusive com o aparecimento de ferrita de contorno de grão e de segunda fase. O resfriamento e o aquecimento durante a fabricação do tubo podem resultar em grandes alterações na microestrutura das regiões inferiores, alterando assim as fases e os constituintes presentes em cada região de fabricação. As durezas das regiões foram compatíveis com a microestrutura identificada, sendo que as regiões inferiores, com maior quantidade de ferrita, apresentaram menor dureza, enquanto as regiões

superiores, com uma maior quantidade de grãos de perlita em relação às regiões inferiores, exibiram maior dureza.

- O ensaio de corrosão em laboratório revelou que o tubo MADA possui uma menor taxa de corrosão nos meios de Cl_2 e água e tricloro, enquanto o tubo atual apresentou uma taxa de corrosão levemente inferior no hipoclorito de sódio. O mecanismo de corrosão predominante foi semelhante nas amostras: as expostas a ácidos fortes sofreram corrosão uniforme, enquanto aquelas expostas a compostos de cloreto e ácidos fracos apresentaram uma grande quantidade de corrosão por picada.
- No ensaio de corrosão em serviço, o tubo MADA apresentou uma taxa de corrosão e perda de espessura significativamente menor em comparação ao tubo atual. Um fator que pode contribuir para esse resultado é a presença de elementos de liga no tubo MADA, que podem amenizar o processo corrosivo.
- Tubos fabricados por MADA com arames de aço carbono contendo elementos de liga representam uma alternativa altamente eficaz para a condução de cloro, graças às suas excelentes qualidades mecânicas, equivalentes a um material grau B, e à sua boa resistência à corrosão. Essas características não apenas superam as do material atualmente utilizado nas plantas, mas também proporcionam maior durabilidade e confiabilidade, assegurando um desempenho superior ao longo do tempo.

Dentre as limitações do trabalho, destaca-se que a parametrização foi realizada de maneira objetiva, com o intuito de obter parâmetros que produzissem peças com qualidade adequada, sem considerar fatores econômicos ou medições precisas que pudessem otimizar a fabricação. A ausência de qualquer tipo de tratamento térmico aplicado ao tubo MADA, o que poderia otimizar suas propriedades mecânicas para a aplicação específica. A usinagem se restringiu a investigar apenas avanços de valores reduzidos, considerados de acabamento. Além disso, o ensaio de corrosão em serviço não contou com controle de temperatura ou umidade.

6. TRABALHOS FUTUROS

Realizar a parametrização da fabricação de tubos com o objetivo de encontrar o valor economicamente ótimo, considerando a vazão de gás de proteção e o consumo de energia.

Efetuar tratamentos térmicos nas peças fabricadas por MADA e verificar as características das peças pós-tratamento.

Avaliar a fabricação de peças MADA utilizando diferentes arames mais resistentes a corrosão, como o Inconel 625, e analisar o comportamento dessas peças em ensaios de corrosão por cloro.

Avaliar a fabricação do tubo flangeado com outros processos, como o CMT, e técnicas de deposição, como o arco rotacional e o zigue-zague.

Realizar uma avaliação detalhada da microestrutura resultante das peças esbeltas fabricadas por MADA e compará-las com diferentes regiões das camadas de deposição.

REFERÊNCIAS

American Society for Testing and Materials (ASTM). Norma ASTM E10-18: Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken, 2018.

American Society for Testing and Materials (ASTM). Norma ASTM G48-11: Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution. West Conshohocken, 2020.

American Society for Testing and Materials (ASTM). Norma ASTM A370-24: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. West Conshohocken, 2024.

American Society for Testing and Materials (ASTM). Norma ASTM E407-07e1: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. West Conshohocken, 2018.

American Society for Metals International (ASM). ASM Handbook Volume 13A e C: Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection / Environments and Industries. ASM Handbook Committee, Novelty, 2003.

Anelli, E.; Di Nunzio, P.E.. Classification of microstructures of low carbon steels preparation of a set of standard micrographs. ECSO, agreement 7210-EC/405. CSM, Roma, 1996.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Norma ABNT NBR ISO 513: Classificação e aplicação de metais duros para a usinagem com arestas de corte definidas — Designação dos grupos principais e grupos de aplicação. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Norma ABNT NBR ISO 1832: Pastilhas intercambiáveis para ferramentas de corte - Designação. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Norma NBR ISO 4287: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Norma NBR ISO 4288: Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Norma NBR 5590: Tubos de aço-carbono com ou sem solda longitudinal, pretos ou galvanizados – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

Bai, Mingwen; Reddy, Liam; Hussain, Tanvir. Experimental and thermodynamic investigations on the chlorine-induced corrosion of HVOF thermal sprayed NiAl coatings and 304 stainless steels at 700 °C. Corrosion Science, Nottingham, v. 135, p. 147-157, 2018.

Barbosa, A.N. Segurança do Trabalho e Gestão Ambiental. 2.ed. São Paulo: Atlas, 2008.

Barbosa, Lucas Melo Queiroz. Torneamento de Aço Endurecido ABNT - D6 com Ferramenta de PCBN Refrigerada Através de Galerias Internas. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2021.

Bartsch, H.; Kühne, R.; Citarelli, S.; Schaffrath, S.; Feldmann, M.. Fatigue analysis of wire arc additive manufactured (3D printed) components with unmilled surface. *Structures*, Aachen, v. 31, p. 576-589, 2021.

Bernardo, L. D.; Dantas, A. D. B.; Voltan; P. E. N.. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. São Carlos: LDiBe editora, 2017, 3a ed..

Bozkurt, Y.B. *et al.*. Analysis of electrochemical corrosion performance of 316L stainless steel fabricated and textured by selective laser melting. *Journal of Manufacturing Processes*, Erzurum, v. 119, p. 293-304, 2024.

Brasil. Portaria da Consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde, 2023, Disponível em: <https://portalsinan.saude.gov.br/images/documentos/Legislacoes/Portaria_Consolidacao_5_28_SETEMBRO_2017.pdf> Acesso em: 05 de julho de 2023.

BRK. Cloro na água. 2023, Disponível em:< <https://blog.brkambiental.com.br/cloro-na-agua/>>; Acesso em:05 de julho de 2023.

Casimiro, P.J.N., Materiais de contacto com água para consumo humano, mecanismos de degradação e contaminação. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 2011.

Casuso, M.; Veiga, F.; SUÁREZ, A.; Bhujangrao, T.; Aldalur, E.; Artaza, T.; Amondarain, J.; Lamikiz, A.. “Model for the prediction of deformations in the manufacture of thinwalled parts by wire arc additive manufacturing technology.” *Metals*, Gipuzkoa, v. 11 (5), 678, 2021.

Cipirová, Lucia *et al.*. Prediction of mechanical properties of Fe–Cr–Mo sintered steel in relationship with microstructure. *Materials & Design*. Bratislava, v.35, p. 619-625, 2012.

Chaitkin *et al.* (2022). Estimating the cost of achieving basic water, sanitation, hygiene, and waste management services in public health-care facilities in the 46 UM. *The Lancet Global Health* Patna. Englewood, v. 10, i.6, p. e840-e849, 2022.

Chen, Meng-Yang *et al.*. The transition from interphase-precipitated carbides to fibrous carbides in a vanadium-containing medium-carbon steel. *Scripta Materialia*. Taiwan, v. 68, p. 829-832, 2013.

Chernovol, Nataliia; Sharma, Abhay; Tjahjowidodo, Tegoeh; Lauwers, Bert; RYMENANT, Patrick Van. "Machinability of wire and arc additive manufactured components". *Journal of Manufacturing Science and Technology*, Leuven, v. 35, p. 379-389, 2021.

Colpaert, H.. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. 4ª ed.. São Paulo: Blucher, 2008.

Confederação Nacional Da Indústria (CNI). Comparações Internacionais: Uma Agenda para os Desafios do Saneamento Brasileiro. Brasília: CNI, 2017.

Craig, Bruce D.; Anderson, David B.. Handbook of Corrosion Data. 3ª ed. Novelty: ASM International. 2002.

Dixon, Bob; Walker, John R.. Machining Fundamentals. Ed. The Goodheart-Willcox Company, Illinois, EUA, 688 p., 2023, 11ª ed..

Dongre, M.;Tiwari, A.; Rathee, S.;Srivastava, M.. Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behaviour. Materials Chemistry and Physics, Jabalpur, v. 294, 126988, p. 1-31, 2023.

Eschelbacher, S.; Möhring, H.C.. Hardness and Orthogonal Cutting Analyses of a Wire and ArcAdditiveManufactured (WAAM) Sample. 9th CIRP Conference on High Performance Cutting, Stuttgart, v. 101,104108, p. 26-29, 2021.

Ferreira, B. O.. Estudo da Corrosão Provocada pelo Cloro e Procura de Materiais Alternativos. 2015 - Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto, 2015.

Feucht, T.; Lange, J.; Erven, M.; Costanzi, C. B.; Knaack, U.; Waldschmitt B.. “Additive manufacturing by means of parametric robot Programming”. Construction Robotics, Leipzig, v. 4, 31 – 48, 2020.

Garcia, A. C.; Wood, D.; Martina F.; Williams. S. W.. “A comparison framework to support the selection of the best additive manufacturing process for specific aerospace applications”. Rapid Manufacturing, Burnley, v. 9, p. 194-211, 2020.

Gonçalves, R.M.P., Evolução dos sistemas de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais. Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, 2013.

Goviazin *et al.* (2022) Static and dynamic mechanical properties of wire and arc additively manufactured SS316L and ER70S6. Mechanics of Materials, Haifa, v. 164, p. 1-11, doi 104108, 2022.

International Organization for Standardization (ISO). Norma ISO 6506: Metallic materials — Brinell hardness test. Genebra, 2014.

International Organization for Standardization (ISO). Norma ISO 9227: Corrosion tests in artificial atmospheres — Salt spray tests. Genebra, 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO/ASTM 1302. “Geometrical Product Specifications (GPS) - Indication of surface texture in technical product documentation".”. Geneva: ISO/ASTM, 2002.

International Organization for Standardization (ISO). Norma ISO 21920: Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile. Genebra, 2021.

International Organization for Standardization (ISO). Norma ISO/ASTM 52900: Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology. Geneva: ISO/ASTM, 2015.

Jafari, D.; Vaneker, T.H.J.; Gibson, I. Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts. *Materials & Design*, Twente, v. 202, 109471, p. 1-50, 2021.

Justus. Panicker C.T.; Senthilkumar, V.. (2024) Effect of arc rotation on the enhancement of mechanical properties of ER70S6 in WAAM. *Vacuum*, Tamil Nadu, v. 220, doi 112837, 2024.

Karabulut *et al.*. Fatigue of wire arc additively manufactured components made of unalloyed S355 steel . *International Journal of Fatigue*, Sint-Katelijne-Waver, v. 184, doi 108317, 2024.

Kaesche, Helmut. *Corrosion of Metals: Physicochemical Principles and Current Problems*. 1ed. editora Springer, Erlangen, 2003.

Kardec, A.; Nascif, J.; 2019. *Manutenção – Função Estratégica*. 5ª ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora.

Khan, Anas Ullah; Chatterjee, Satyajit; Madhukar, Yuvraj K.. (2024) TIG assisted surface finish enhancement in MIG-based wire arc additive manufacturing. *Manufacturing Letters*, Indore, v. 40, p. 26 - 30, 2024.

Krajčoviech, Stanislav *et al.*. Identification of process Prime A turning when machining steel C56E2 and monitoring of cutting forces. *Transportation Research Procedia*, Slovakia, v. 55, p. 605-612, 2021.

Kreysa, G.; Schütze, M.. *Corrosion handbook : Corrosive Agents and Their Interaction with Materials Volume 4*. 2ed.. editora Wiley-VCH. Frankfurt, 2005

Kryston, Amy; Woods, Courtney G.; Manga, Musa. (2024) Social barriers to safe sanitation access among housed populations in the United States: A systematic review. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. Chapel Hill, v. 257, doi 114326, 2024.

Li, J.; Chen, J.; Song, J.; Zhang, X.; Li, Z.; Luo, H.; Yu, W.; Dong, C.; Xiao, K.. Research on corrosion behavior of truck body steel in chlorine-containing sulfuric acid environment. *Journal of Materials Research and Technology*, Beijing, v. 21, p. 1878-1889, 2022.

Liu, Menghao *et al.*. Investigations on the passive and pitting behaviors of the multiphase stainless steel in chlorine atmosphere. *Journal of Materials Research and Technology*, Beijing, v. 28, p. 3365-3375, 2024.

Lopes, Jadna Rodrigues. *Avaliação de riscos existentes durante as atividades de Manutenção no sistema de coleta e tratamento de esgoto Sanitário*. Universidade do Extremo Sul Catarinense. 2017.

Luna, Guilherme Gomes; Graziano, Luiz Felipe Pinto Lima; Pinho, Rodrigo de. *Saneamento Básico*. Editora Lumen Juris. 1ed. São Paulo. 2017.

Machado, Álisson Rocha; Abrão, Alexandre Mendes; Coelho, Reginaldo Teixeira; Silva, Márcio Bacci da. *Teoria da usinagem dos materiais*. Ed. Edgard Blucher Ltda, São Paulo, Brazil, 408p., 2015, 3ª ed..

Mohammadi *et al.*. Pulsed gas metal arc additive manufacturing of low-carbon steel: Microstructure observations and mechanical properties. *Materials Today Communications*, Windsor, v. 38, doi 107637, 2024

Mohitpour, M.; Golshan, H.; Murray, A.. *Pipeline Design & Construction: A Practical Approach*. 2 ed. ASME Press, Calgary, 2000.

Montevecchia, Filippo; Grossia, Niccolò; Takagib, Hisataka; Scippaa, Antonio; Sasaharab, Hiroyuki; Campatellia, Gianni. Cutting forces analysis in additive manufactured AISI H13 alloy. *7th HPC – CIRP Conference on High Performance Cutting*, Chemnitz, v. 46, 104108, p. 476-479, 2021.

Nagasai, Bellamkonda Prasanna *et al.*. 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*, Annamalai nagar, v. 36, p. 100-116, 2022.

National Association of Corrosion Engineers (NACE). *Método de Teste TM0170: Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H2S Environments*. Houston, 2013.

Nickel Institute. *Stainless Steel and Nickel Base Castings*. 1 ed, Ubiquitous Nickel, Toronto, 1997.

Panicker e Senthilkumar (2023) Rotational arc based dual wire arc additive manufacturing of low alloy steel with NiCrMo inclusions for improved mechanical properties. *Materials Letters*, Tamil Nadu, v. 332, doi 133498, 2023.

Pannoni, Fabio D. *Princípios da Proteção de Estruturas Metálicas em Situação de Corrosão e Incêndio*. 6ed. Gerdau, São paulo, 2015.

Pattanayak, Suvranshu; Sahoo, Susanta Kumar. Gas metal arc welding based additive manufacturing — a review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Rourkela, v. 33, p. 398-442, 2021.

Pattanayak, Suvranshu; Sahoo, Susanta Kumar; Sahoo, Ananda Kumar; Satpathy, Mantra Prasad. “Microstructure, strength, and fiber texture evolutions in arc-based casting using low-carbon steel wire”. *Journal of Manufacturing Processes*, Odisha, v. 101, p. 1453–1467, 2023.

Qi, Peng *et al.*. Effects of cast iron pipe corrosion on nitrogenous disinfection by-products formation in drinking water distribution systems via interaction among iron particles, biofilms, and chlorine. *Chemosphere*, Guangzhou, V.292, 133364, 2022.

Renzo, D.J. De. *Corrosion Resistant Materials Handbook*. 4 ed. Noyes Data Corporation, Nova Jersey, 1985.

Revie R. Winston; Uhlig, Herbert H.. *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering*. 4ed. John Wiley & Sons: Wiley-Interscience, Nova Jersey, 2008.

Roberge, Pierre R.. Handbook of Corrosion Engineering. 2 ed. Editora McGraw-Hill. Nova York, 2012.

Rocha, Charles Lourenço; Pereira, Leonardo Dias. Análise de falhas e seleção de material de um mangote que falhou em serviço, interligando o cilindro de cloro ao manifold do sistema de tratamento de água de uma planta industrial. Congresso Técnico-Científico de Engenharia e Agronomia - CONTECC 2021. Rio de Janeiro, 2021.

Rossi, R. A.; Santos, E. Conflito e Regulação das Águas no Brasil - A Experiência do Salitre. Universidade Federal da Bahia. Salvador, p. 151-167. 2018.

Rodrigues *et al.* (2023) Hybrid additive manufacturing of ER70S6 steel and Inconel 625: A study on microstructure and mechanical properties. Materials Today Communications, Karnataka, v. 37, doi 106977, 2023.

Sabará. Ficha de informações de segurança de produtos químicos - FISPQ - 001 - Cloro Liquefeito. Tatuapé, 2022. Acesso em Outubro de 2023. Online. Disponível em: <<https://www.Sabaráquimicos.com/fispq/>>.

Saneamento de Goiás (SANEAGO). Apresentação Institucional: SANEAGO, 2023. Disponível em:<<http://www.saneago.com.br/>>. Acesso em Dezembro de 2023.

Schoell, Ryan *et al.*. In situ synchrotron X-ray tomography of 304 stainless steels under going chlorine-induced stress corrosion cracking. Corrosion Science, Raleigh, v. 170, doi 108687, 2020.

Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). Diagnóstico dos serviços de água e esgoto. Brasília, 2022. Acesso em Outubro de 2023. Online. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>>.

Scotti, A.; Ponomarev, V.. Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. São Paulo: Artliber Editora, 2014, 2ª ed..

Smith, Peter. Piping Materials Selection and Applications. 1 ed. Elsevier: Gulf Professional Publishing. Burlington, 2005.

Sudarsan, C.; Katiyar, B. S.; Behera, D. R.; Rakshit, R.; Rajak, B.; Perka, A. K.; Arora K. S.; Mandal, S.; Panda S. K.. Microstructural, Mechanical, and Corrosion Performance of Components Fabricated through Wire Arc Additive Manufacturing Process. Journal of Materials Engineering and Performance, Jamshedpur, 1059-9495, 2023.

SUMIG. Catálogo de informações técnicas do arame de aço carbono de alta qualidade ER70S-6. Caxias do Sul, 2019. Disponível em: <https://www.sumig.com/arquivo-catalogo/06_Acessorios/Arame_MIG_MAG_ACO_CARBONO_SUMIG.pdf>. Acesso em Janeiro de 2023.

Talbot, David E.J. Talbot, James D.R.. Corrosion Science and Technology. 3ed. CRC Press, Nova York, 2018.

The Chlorine Institute. “Pamphlet 1) chlorine basics”. Arlington: *The Chlorine Institute*, 2023, 9° ed..

The Chlorine Institute. “Pamphlet 6) Piping Systems for Dry Chlorine”. Arlington: *The Chlorine Institute*, 2020, 17° ed..

Tsutiya, Milton Tomoyuki. Abastecimento de água. 3.ed. Editora do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

Toyserkani, E.; Dyuti, S.; Ibhadode, O.O.; Liravi, F.; Russo, P.; Taherkhani, K.. Metal additive manufacturing. New Jersey: Wiley, 2022.

Umemoto M. *et al.*. Relationship between hardness and tensile properties in various single structured steels. *Materials Science and Technology*. Toyohashi, v.17, p.505-511, 2001.

Vimal, K.E.K.; Srinivas, M. N.; Rajak S.. Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys: a review. *Materials Today: Proceedings*, Patna, v. 41, pt. 5, p. 1139 – 1145, 2021.

Wang, Xuefei *et al.*. Investigations on the passive and pitting behaviors of 17 – 4 PH martensitic stainless steel containing Al₂O₃ inclusions in chlorine environment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Beijing, v. 660, doi 130861, 2023.

Wang, Qian *et al.*. Corrosion of Q345B Steel in Soil Solution Extract Containing Chloride Ions. *International Journal of Electrochemical Science*, Deyang, v. 17, 220215, 2022.

Yang, Kuan; Guo, Xinshuang; San, Xingyuan. Dissolution and redistribution behavior of Cu-rich phase: Implications for corrosion resistance in Cu-bearing duplex stainless steel in chloride media. *International Journal of Electrochemical Science*, Baoding, v.19, doi 100634, 2024.

Zhao, Wenyong *et al.*. Deepening the understanding of arc characteristics and metal properties in GMAW-based WAAM with wire retraction via a multi-physics model. *Journal of Manufacturing Processes*, Nanjing, V. 97, p. 260-274, 2023.