

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

LÚCIO MATEUS SANTANA CARVALHO

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TRAJETÓRIA NA FABRICAÇÃO DE ROLDANA DE  
FeCrC-Nb PELO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A  
ARCO**

GOIÂNIA

2023



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

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

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

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

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

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Lúcio Mateus Santana Carvalho

Título do trabalho: Avaliação do efeito da trajetória na fabricação de roldana de FeCrC-Nb pelo processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

### 2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [ X ] SIM [ ] NÃO<sup>1</sup>

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

#### Casos de embargo:

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

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



Documento assinado eletronicamente por **Demostenes Ferreira Filho, Professor do Magistério Superior**, em 15/09/2023, às 10:41, 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 **Lucio Mateus Santana Carvalho, Discente**, em 15/09/2023, às 20:31, 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](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4044998** e o código CRC **5518F370**.

---

Referência: Processo nº 23070.023417/2023-17

SEI nº 4044998

LÚCIO MATEUS SANTANA CARVALHO

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TRAJETÓRIA NA FABRICAÇÃO DE ROLDANA DE  
FeCrC-Nb PELO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A  
ARCO**

Projeto Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pela Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás.

Orientador: Prof. Dr. Demostenes Ferreira Filho

GOIÂNIA

2023

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

Carvalho, Lúcio Mateus Santana

Avaliação do efeito da trajetória na fabricação de roldana de FeCrC-Nb  
pelo processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco [manuscrito]  
/ Lúcio Mateus Santana Carvalho. - 2023.

31 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Demostenes Ferreira Filho.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade  
Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de  
Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2023.

Bibliografia.

Inclui gráfico, tabelas.

1. FeCrC. 2. Trajetória de soldagem. 3. Dureza. 4. Microestrutura.  
5. Carbonetos. I. Ferreira Filho, Demostenes, orient. II. Título.

CDU 621



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

### ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 15 (quinze) dias do mês de setembro do ano de 2023, às 9h iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “Avaliação do efeito da trajetória na fabricação de roldana de FeCrC-Nb pelo processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco”, de autoria de Lúcio Mateus Santana Carvalho, do curso de Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo Dr. Demostenes Ferreira Filho - orientador (EMC/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Renata Rodrigues Alves (EMC/UFG) e Vitória Ferreira de Oliveira Marques (Externo). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 9,9 (nove vírgula nove) , tendo sido o TCC considerado aprovado.

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



Documento assinado eletronicamente por **Demostenes Ferreira Filho, Professor do Magistério Superior**, em 15/09/2023, às 10:34, 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 **Vitoria Ferreira De Oliveira Marques, Discente**, em 15/09/2023, às 10:37, 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 **Renata Rodrigues Alves, Usuário Externo**, em 15/09/2023, às 15:10, 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](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4044658** e o código CRC **79DB07F6**.

# **AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TRAJETÓRIA NA FABRICAÇÃO DE ROLDANA DE FeCrC-Nb PELO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO**

## **EVALUATION OF THE EFFECT OF PATTERN IN THE MANUFACTURING OF A FeCrC-Nb SHEAVE BY THE WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS**

Lúcio Mateus Santana Carvalho<sup>1</sup>  
Demostenes Ferreira Filho<sup>2</sup>

**Resumo:** Através do processo de soldagem FCAW utilizando arame tubular, liga FeCrC+Nb, foi possível fabricar peças de elevadas durezas. Este projeto avaliou o uso de trajetórias de soldagem distintas para analisar os valores de dureza nas diferentes regiões da peça, ao longo do cordão e das camadas de solda. Fabricou-se duas roldanas, utilizando trajetórias de tecimento e de círculos concêntricos (CC). Observou-se que a presença de carbonetos primários  $M_7C_3$  e NbC interferiu nas durezas. A trajetória de tecimento apresentou dureza mais elevada que a trajetória de CC, sendo justificado pela maior presença de carbonetos duros.

**Palavras-chave:** FeCrC. Trajetória de soldagem. Dureza. Microestrutura. Carbonetos.

**Abstract:** The welding process with flux cored wire (FCAW), using FeCrC+Nb alloy, made it possible to produce high hardness parts. This project evaluated the use of different weld patterns to analyze hardness values in different areas of the part, along the bead and weld layers. Two sheaves were made by different welding patterns, weaving and concentric circles (CC). The presence of the primary carbides  $M_7C_3$  and NbC was found to affect hardness. The weaving pattern presented higher hardness than the CC pattern, which is justified by the strong presence of hard carbides.

**Keywords:** FeCrC. Welding pattern. Hardness. Microstructure. Carbides.

---

<sup>1</sup>Graduando em Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação/Universidade Federal de Goiás. ORCID 0009-0002-9699-6262. E-mail: luciocarvalho@discente.ufg.br

<sup>2</sup>Doutor em Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação/Universidade Federal de Goiás. ORCID 0000-0003-4682-5959. E-mail: demostenesferreira@ufg.br

## Resumo

A manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) é um processo que vem ganhando notoriedade nas indústrias, devido a sua praticidade e capacidade de produzir peças com geometrias complexas. Juntamente com o processo de soldagem FCAW utilizando arame tubular, com liga de FeCrC+Nb, foi possível fabricar peças de elevados valores de dureza. Neste trabalho, fabricou-se uma roldana utilizando uma trajetória de tecimento e outra utilizando uma trajetória de círculos concêntricos (CC). Objetivou-se avaliar o uso destas trajetórias de soldagem distintas para analisar os valores de dureza nas diferentes regiões da peça manufaturada. O ensaio de dureza foi realizado em regiões determinadas que trouxeram resultados da superfície (regiões A, B e C) e ao longo das camadas de soldagem (regiões P1, P2 e P3). Pela análise microestrutural, pode-se observar que a presença de carbonetos primários  $M_7C_3$  e NbC interferiram nos valores das durezas. De modo geral, a trajetória de tecimento apresentou valores de dureza mais elevados nas regiões do que a trajetória de CC, sendo justificado pela maior presença de carbonetos duros.

Palavras-chave: FeCrC. Trajetória de soldagem. Dureza. Microestrutura. Carbonetos.

## Abstract

Wire arc additive manufacturing (WAAM) is a process which is gaining notoriety in the industry due to its practicality and the ability to produce parts with complex geometries. Along with the welding process with flux cored wire (FCAW), using FeCrC+Nb alloy, it was possible to produce high hardness parts. In this project, a sheave were made by weaving pattern and another with concentric circles (CC) pattern. This project evaluated the use of this different welding patterns to analyze hardness values in different areas of the part, along the bead and weld layers. The hardness test was carried out in specific areas that yielded results from the surface (areas A, B and C) and along the weld layers (areas P1, P2 and P3). From the microstructural analysis, the presence of primary carbides  $M_7C_3$  and NbC was found to affect hardness. In general, the weaving pattern presented higher hardness than the CC pattern, which is justified by the strong presence of hard carbides.

Keywords: FeCrC. Welding pattern. Hardness. Microstructure. Carbides.

## Introdução e Fundamentação Teórica

Existem princípios que guiam os principais processos de fabricação, sendo baseados na moldagem do material, na subtração de material, na conformação, na união de componentes e na divisão (VOLPATO, 2017). Um princípio emergente que trouxe uma proposta diferente dos demais foi desenvolvido no final da década de 1980, onde ocorre a adição de material para a fabricação de modelos, sendo chamado de *Additive Manufacturing* (AM) ou Manufatura Aditiva (MA). Conhecida como impressão 3D, a manufatura aditiva é um processo de fabricação que utiliza a adição sucessiva de material pela sobreposição de camadas, através de diversos processos de união (VOLPATO, 2017; SILVA et. al., 2020), sendo amplamente utilizada em diversas áreas, desde produção de chaveiros até na área da biomedicina.

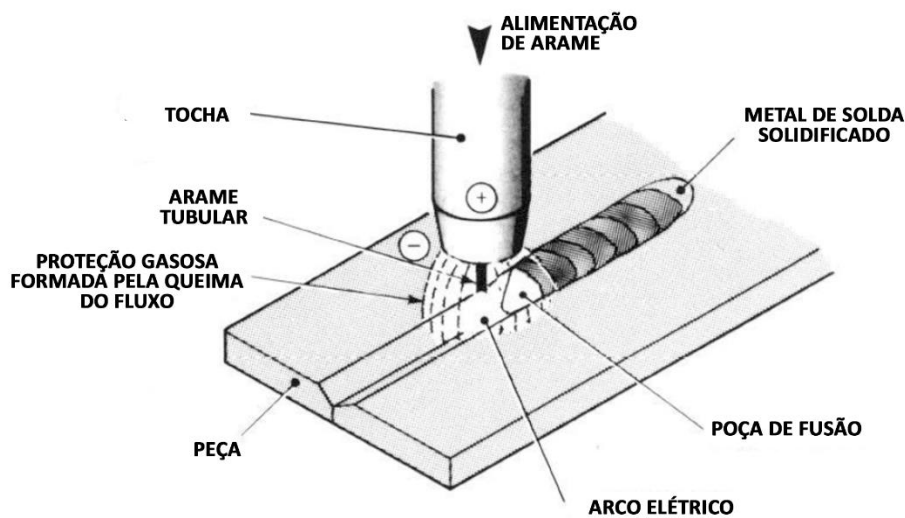
Como exposto por SILVA et. al. (2020), o processo de MA permite construir geometrias muito complexas de serem construídas por outras formas de fabricação, e por esse motivo os estudos acerca desse processo são bem emergentes. Tais estudos trouxeram um aumento na precisão dos equipamentos, redução de custos do mesmo, além de uma ampliação das possíveis aplicações da MA devido a maior variedade de materiais que podem ser aplicados, como por exemplo arames metálicos, polímeros, concreto e materiais cerâmicos.

Existem diversos tipos de manufatura aditiva utilizando adição de metais, cujos principais são fusão em leito de pó (do inglês PBF) e a deposição direta de energia (do inglês DED). A manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) é um tipo de DED que utiliza de processos de soldagem onde o arco elétrico é a fonte de calor, utilizando um eletrodo consumível aquecido por efeito Joule (GIOTTI, F., 2020), para a criação de diversos objetos e peças, por meio de transferências metálicas e dos conceitos da MA (LIU et al, 2020). A MADA é a preferida das indústrias por moldar uma variedade de materiais metálicos, ter alta eficiência de deposição, produzir peças totalmente densas e de alta precisão, isso em um curto espaço de tempo se comparar com outras técnicas, e por possibilitar a construção de estruturas complexas (LIU et al, 2020).

Juntamente com a MADA feita por um manipulador robótico, a utilização de eletrodo tubular auto-protégido para a soldagem maximiza a produtividade e elimina a necessidade de um gás de proteção para a poça de fusão (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005). O eletrodo tubular auto-protégido é um tipo de arame utilizado em soldagem que tem o interior oco para ser preenchido com uma camada de fluxo, este fará o papel de criar a zona de gás, quando fundido, que irá proteger a poça de fusão (KANNAN; MURUGAN, 2006), Figura 1. O processo FCAW (*Flux Cored Arc Welding*) utiliza eletrodo tubular para a soldagem de metais. Apresentando alta qualidade do metal de solda depositado, é um processo facilmente

mecanizado, apresenta alta taxa de deposição e permite trabalhar com parâmetros de soldagem altos, como tensão, corrente e velocidade de soldagem (MOHAMAT, 2012). Se comparado a outros processos de soldagem como soldagem por arco de metal blindado (SMAW), soldagem por arco submerso (SAW), soldagem por arco de gás tungstênio (GTAW), soldagem por arco de gás metálico (GMAW), o processo FCAW tem maior tolerância à ferrugem e carepa do que o GMAW, é mais simples e adaptável que o SAW, requer menos habilidade do operador do que o GTAW e tem maior produtividade que o SMAW (KANNAN; MURUGAN, 2006).

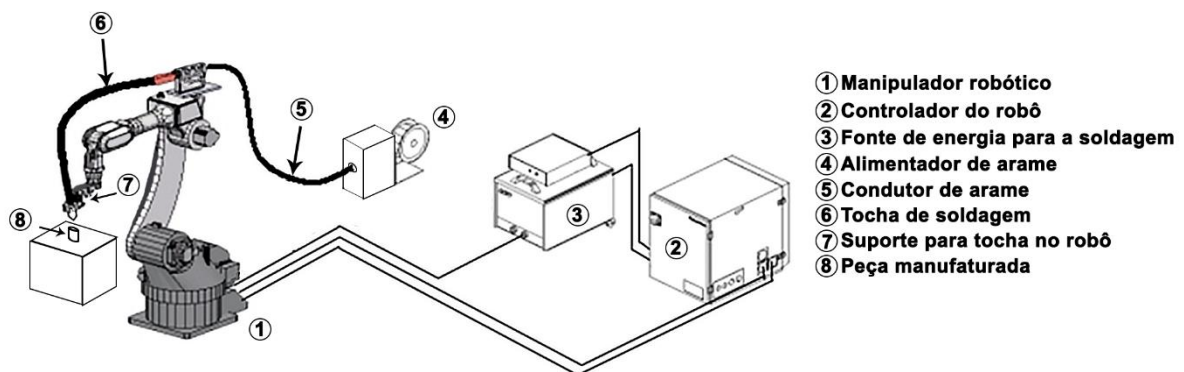
Figura 1 - Processo de soldagem: FCAW



Fonte: Adaptado de ESAB (2005).

Para que seja possível utilizar a MADA juntamente com o processo FCAW, é necessário o uso de uma fonte de soldagem, um alimentador de arame, um manipulador robótico e um controlador do robô, como demonstrado na Figura 2. Essa configuração permite a manufatura de peças com uma larga produtividade (LIU et al, 2020; KANNAN; MURUGAN, 2006).

Figura 2 - Equipamentos necessários para o processo MADA por FCAW



Fontes: Adaptado de SAUNDERS (2020).

Os principais parâmetros controlados pelo operador, que fazem variar os modos de transferência na soldagem FCAW, são a tensão e velocidade de alimentação do arame (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005), e no caso do presente projeto ambos são controlados na fonte, uma vez que o processo é automatizado por meio de um manipulador robótico. O modo de transferência selecionado para este projeto foi a soldagem por curto-circuito devido a sua ampla utilização na indústria por sua grande produtividade; possibilitar soldar em qualquer posição, sendo uma ótima característica para a confecção de peças complexas; ter um ótimo controle sobre a deposição do metal de adição, controlando melhor a transferência de calor para o metal base do que no modo de transferência globular; e utilizar valores de tensão e corrente baixos em comparação ao modo de transferência goticular (spray), economizando energia no processo (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005; ESAB, 2005).

O processo de revestimento duro (*Hardfacing*) utiliza da manufatura aditiva para aplicar revestimentos em peças e ferramentas, buscando obter um incremento da vida útil (SOUZA; FERRARESI, 2017). Utilizando este processo é possível fabricar peças com elevada dureza e durabilidade por meio da MADA, como demonstra LI et. al. (2019), um exemplo são os propulsores marítimos manufaturados por meio de um manipulador robótico, pela empresa Rotterdam Additive Manufacturing LAB (RAMLAB), utilizando ligas de níquel-alumínio-bronze, Figuras 3 (a) e (b). Por serem materiais que apresentam elevada dureza, a fabricação de peças por métodos subtrativos se torna difícil e muitas vezes impossível. Os estudos acerca deste tipo de fabricação são demasiadamente importantes pois, como exposto por PARANHOS (2010), toda a utilização de processos de soldagem, que são utilizados na MADA, com revestimento duro é muito emergente e valioso para as indústrias, uma vez que o mesmo economiza tempo, dinheiro e fornece maior durabilidade a ferramentas e peças. Um exemplo de aplicação é na indústria sucroalcooleira, onde é feito o revestimento duro de facas utilizadas para o corte da cana-de-açúcar, utilizando MADA e FCAW com arame de ligas de FeCrC, como aponta o estudo de SOUZA e FERRARESI (2017).

Figura 3 (a) e Figura 3 (b) – Propulsor marítimo fabricado por meio de MADA, usando ligas de níquel-alumínio-bronze



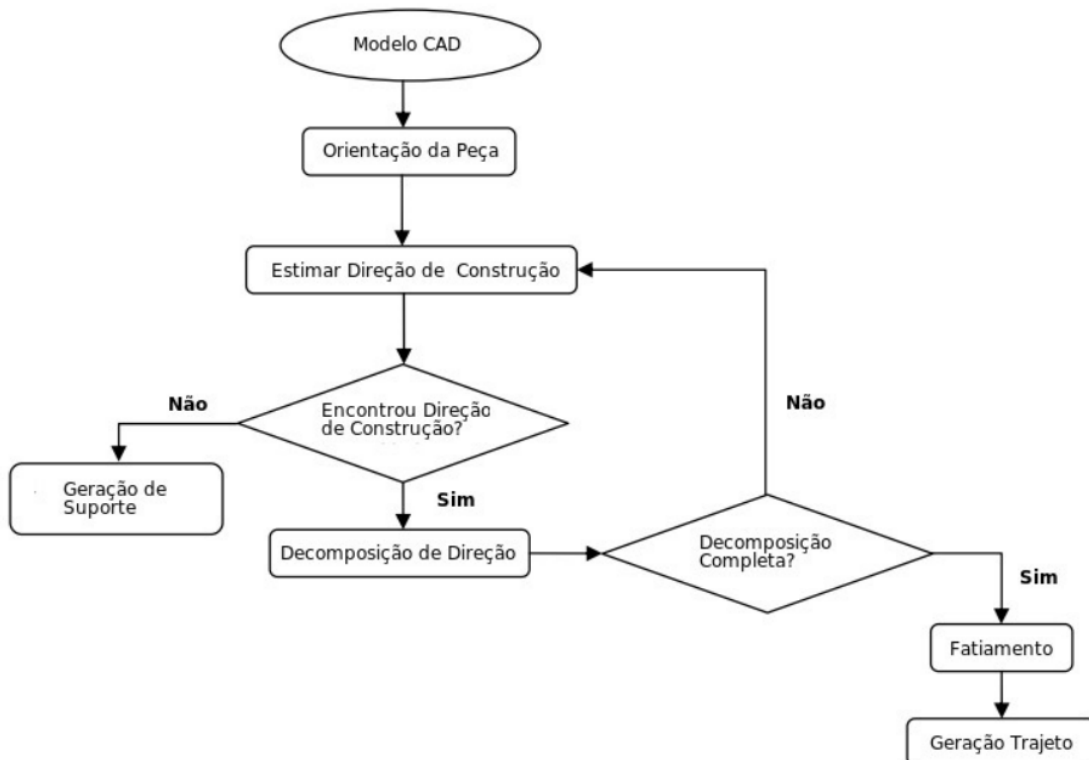
Fontes: RAMLAB (2017 e 2021).

As ligas de FeCrC são utilizadas em revestimento duro por aumentarem a durabilidade de peças e ferramentas, reduzindo o desgaste e conseqüentemente os custos de manutenção (SOUZA; FERRARESI, 2017). Tais ligas apresentam elevada dureza, pois têm uma estrutura austenítica composta por grande quantidade de carbonetos hexagonais primários de alto teor de cromo ( $M_7C_3$ ), imersos em uma matriz eutética, para peças fabricadas por MADA e FCAW (SOUZA; FERRARESI, 2017; LUZ, et. al. 2020; MARQUES; FERRARESI; SOUZA, 2023). Como analisado por LIMA (2008), a presença dos carbonetos  $M_7C_3$  juntamente com carbonetos primários de nióbio NbC, na microestrutura de ligas de FeCrC+Nb, aumenta a dureza dos materiais e melhora a resistência ao desgaste da peça, por serem carbonetos que apresentam elevada microdureza HV de acordo com WANG e LI (2010, apud LUZ, et. al. 2020). O NbC é um elemento nucleador e refinador de carbonetos, então sua presença faz com que a microestrutura seja mais refinada, e com microestruturas mais refinadas haverá menos propensão a propagação de trincas de solidificação (DVORNAK, et. al. 1991, apud LUZ, et. al. 2020).

Para que a MADA utilizando um manipulador robótico seja realizada, alguns passos devem ser seguidos e parâmetros devem ser programados no robô, envolvendo a modelagem em CAD, planejamento da trajetória 2D, modelagem do cordão de solda, configuração e escolha de parâmetros de soldagem e a geração do código do robô (DING, D. et all, 2016). A Figura 4 ilustra um sequenciamento de passos que envolvem a modelagem em CAD da peça que se deseja manufaturar e a programação do manipulador robótico. Nesta última parte são definidos parâmetros importantes para a manufatura da peça pelo robô, como a distância do bico de solda à peça, a quantidade de camadas, a direção da tocha de soldagem, a velocidade de soldagem e

principalmente a trajetória que a tocha de soldagem irá realizar. A escolha da trajetória da solda, realizada pelo manipulador robótico, é um dos passos mais importantes para a manufatura de peças utilizando MADA (DING, D. et all, 2016). Este parâmetro guia principalmente a espessura da peça final e como será feita a solda, tendo interferência nas características mecânicas da peça, como por exemplo na dureza, o que será demonstrado neste trabalho.

Figura 4 - Esquema dos passos para a fabricação de uma peça usando MA



Fonte: GIOTTI, F. 2020 (adaptado de SINGH; DUTTA; ARBOR, 2009).

Neste projeto, objetiva-se a análise de o quanto a diferença entre uma peça feita com a trajetória de tecimento e outra feita com a trajetória de círculos concêntricos (CC), interfere na dureza das roldanas, sendo ela uma peça circular feita inteiriça de material duro e que foi manufaturada neste estudo. Na trajetória por tecimento a solda é feita em um movimento dito tecimento, onde a tocha realiza movimentos triangulares para que se atinja a espessura requerida para a peça, enquanto faz o movimento circular para formar a roldana. A tocha irá realizar tais movimentos, programados no robô, enquanto o arame é depositado e soldado, realizando a manufatura da peça. Assim, após finalizada uma camada, o manipulador realiza o comando onde a tocha sobe e inicia uma nova camada com a mesma trajetória, até atingir o número requerido de camadas. Por outro lado, a trajetória de círculos concêntricos não realiza nenhum movimento que teça a solda, apenas trajetórias constantes que imprimem três circunferências

e, após o comando para subir, confecciona outras circunferências concêntricas às de baixo até que se atinja o número exigido de camadas. A principal contribuição deste projeto é avaliar as técnicas de aplicação do processo MADA em materiais utilizados em revestimento duro.

### **Materiais e processos para a soldagem**

Neste trabalho foi utilizado, como metal de adição, o arame tubular auto-protégido UTP AF Ledurit 68 de 1,6 mm de espessura, sendo este uma liga de Ferro-Cromo-Carbono-Nióbio (FeCrC+Nb). Utilizou-se tal liga para fornecer à peça um revestimento duro, com elevado valor de dureza, segundo UTP 2018, entre 772 e 832 HV. Encontra-se na Tabela 1 a composição química deste arame. Como substrato para a soldagem foram utilizados cilindros de aço A36, cuja composição química se encontra na Tabela 2.

Tabela 1. Composição química do arame tubular auto-protégido UTP AF Ledurit 68

<b>Porcentagem (%)</b>				
<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Nb</b>
5,5	0,3	0,3	22,0	7,0

Fonte: Adaptado UTP, 2018

Tabela 2. Composição química do substrato de aço A36

<b>Porcentagem (%)</b>				
<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>S</b>	<b>P</b>	<b>Cu</b>
0,26	0,75	0,05	0,04	0,2

Fonte: Adaptado Trimetais

A manufatura aditiva utilizando o processo FCAW foi realizada pelo manipulador robótico Yaskawa Motoman HP20, Figura 5, onde foram programadas as trajetórias e modificados os parâmetros de soldagem, para que fossem realizadas as confecções das roldanas.

Figura 5 - Manipulador robótico utilizado para a MADA com FCAW



Fonte: Próprios autores.

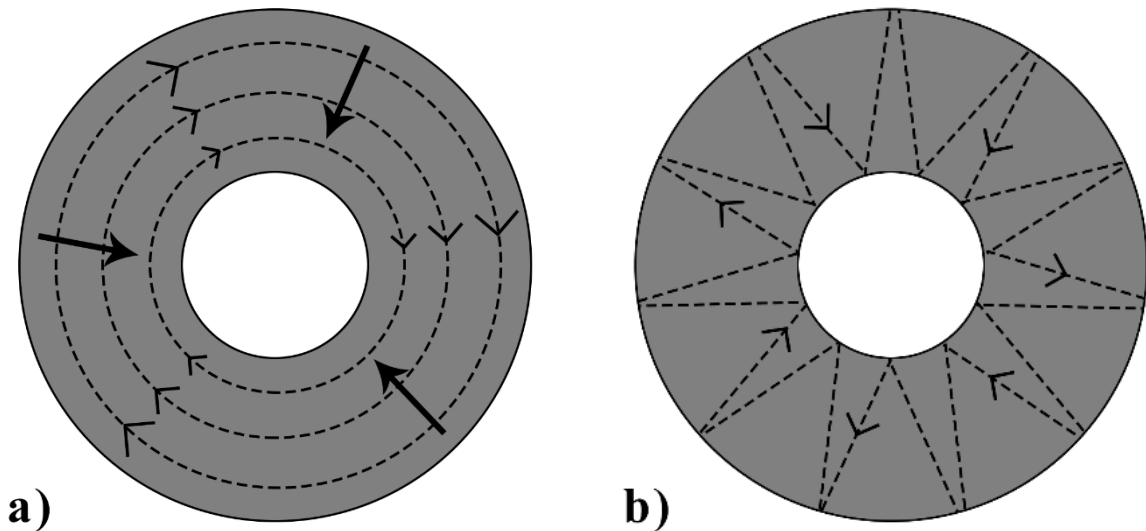
Para a manufatura das peças, o manipulador robótico foi programado com dois movimentos de trajetórias. Na Figura 6(a) é demonstrado como a tocha realiza a trajetória de círculos concêntricos (CC), realizando-se o deslocamento de três circunferências com trajetos lineares por camada, feitas de fora para dentro. Já a Figura 6(b) apresenta a trajetória de tecimento, realizada pela tocha, realizando-se uma única circunferência com tecimento (oscilação lateral) por camada. Foram feitas 5 camadas de espessura para cada peça. As velocidades que foram realizadas as soldagens foram diferentes pois a trajetória de CC necessita de 3 círculos por camada para construir a roldana com a espessura da parede que se queria atingir, de aproximadamente 14 mm, já a trajetória de tecimento atingia essa espessura em apenas uma volta, por isso a velocidade da CC selecionada é 3 vezes maior do que a escolhida para a trajetória de tecimento, Tabela 3. Os demais parâmetros (tensão, velocidade de alimentação, amplitude e DBCP) foram baseados no trabalho de SILVA e FERRARESI (2019), sendo modificados até que se atingisse o aspecto de solda desejado, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de soldagem, processo FCAW

<b>Tensão (V)</b>	20	
<b>Velocidade de alimentação (m/min)</b>	1,7	
<b>Amplitude</b>	5	
<b>DBCP (mm)</b>	12	
<b>Velocidade de soldagem (cm/min)</b>	Para tecimento	10
	Para círculos concêntricos	30

Fonte: Próprios Autores.

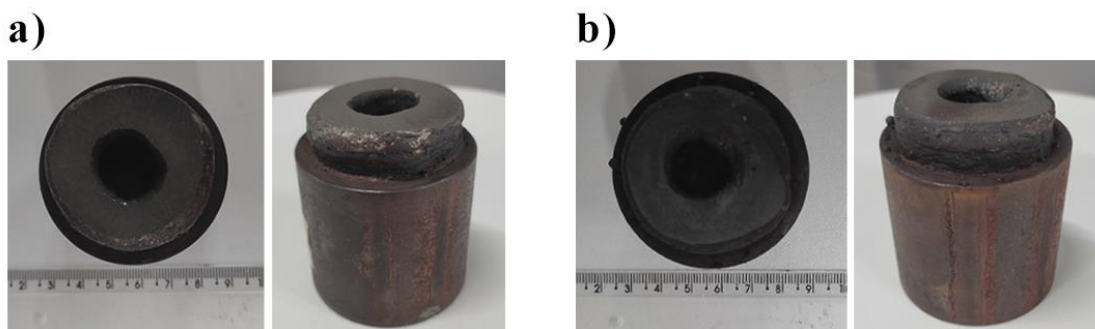
Figura 6 - Representação das trajetórias realizadas pela tocha no processo FCAW:  
a) Círculos Concêntricos (CC); b) Tecimento



Fonte: Próprios Autores.

As peças manufaturadas são apresentadas na Figura 7. Visando a obtenção de um melhor acabamento superficial, planificando a superfície, e também para que o ensaio de dureza seja realizado internamente à peça, sem ser em cima do cordão de solda, realizou-se o processo de retificação, utilizando a retífica plana Atlasmaq RPA-800. Os parâmetros para a retificação foram profundidade de 0,010 mm e avanço de 100 mm/100.

Figura 7. Roldanas manufaturadas: a) Trajetória de tecimento; b) Trajetória de CC



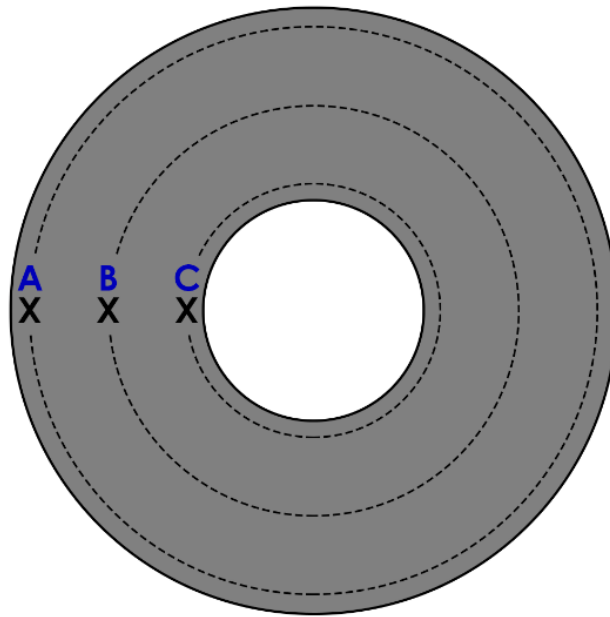
Fonte: Próprios Autores.

### Medição de dureza e microdureza

O ensaio de dureza foi realizado de acordo com a norma ASTM E 92-82 (2003), utilizando o durômetro da marca Mitutoyo modelo HV-100. Os parâmetros selecionados para o teste foram uma força de 10 kgf aplicada durante 15 segundos. Esta carga foi selecionada

visando realizar uma medida de dureza geral que englobasse tanto a matriz quanto os precipitados. Foram, então, realizadas 7 medições no decorrer de cada uma das linhas tracejadas nas regiões A, B e C, descritas na Figura 8, para ambas as roldanas, com a finalidade de se encontrar os valores das durezas ao longo do cordão de solda, na camada superior das peças.

Figura 8 - Linhas tracejadas representando onde foram feitas as medições de dureza para as regiões A, B e C



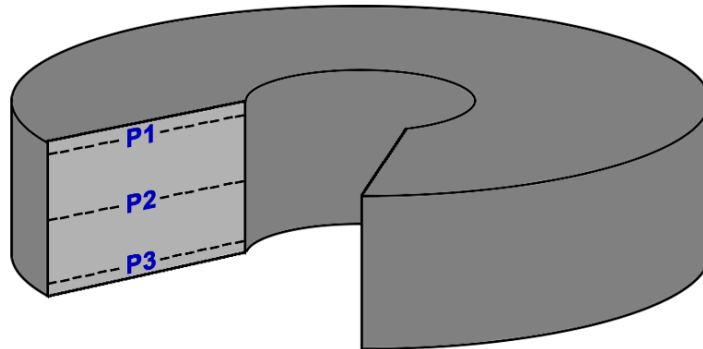
Fonte: Próprios Autores.

A região A mede a dureza na extremidade mais perto da borda externa da roldana, a região B mede a dureza no meio da roldana e a região C mede a dureza na extremidade mais interna da roldana. Por fim, foram desconsideradas a maior e a menor medição, a fim de minimizar os erros experimentais, obtendo os valores médios com as 5 medidas restantes. Foi calculada a incerteza estimada da média à tal processo e por fim foi gerado um gráfico comparativo entre as medidas de dureza nas regiões A, B e C entre as roldanas feitas com trajetórias por tecimento e por círculos concêntricos, Figura 17.

A fim de se obter o valor da dureza ao longo das camadas de deposição de arame, foram feitos cortes transversais nas duas roldanas. Com os mesmos parâmetros dos ensaios anteriores, foram realizadas 7 medições de dureza no decorrer das linhas tracejadas nas regiões P1, P2 e P3, descritas na Figura 9, para ambas as roldanas. A região P1 mede a dureza na extremidade mais longe do metal de base (substrato), a região P2 mede a dureza no centro e a região P3 na camada mais perto do metal de base. A fim de minimizar os erros experimentais, também foram

obtidos os valores médios desconsiderando a maior e menor medições, utilizando as 5 medições restantes. Foi feito um gráfico comparativo entre as medidas de dureza nas 3 regiões entre as roldanas feitas com trajetória por tecimento e por círculos concêntricos, Figura 18.

Figura 9 – Linhas tracejadas representando onde foram feitas as medições de dureza para as regiões P1, P2 e P3, para ambas as roldanas.



Fonte: Próprios Autores.

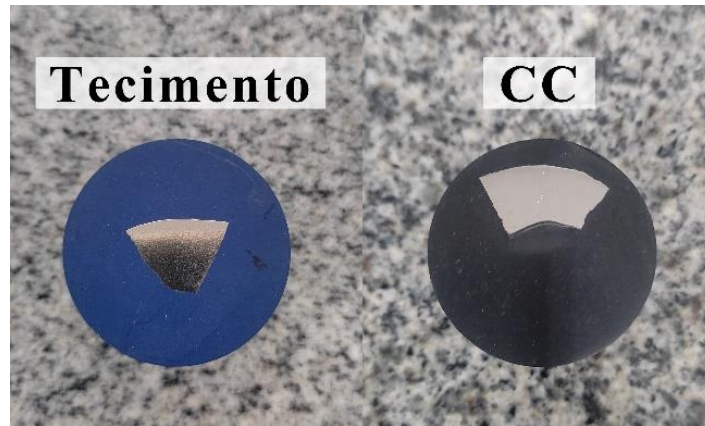
A fim de analisar a microdureza da microestrutura foi realizado um ensaio de microdureza Vickers, com equipamento da marca Mitutoyo modelo HM-200. Os parâmetros selecionados para o teste foram uma força de 0,05 kgf aplicada durante 15 segundos. Foram realizadas 3 (três) medições na matriz e nos carbonetos.

### **Microscopia e metalografia**

Para a análise metalográfica, foi cortada duas amostras de cada peça, uma com o corte selecionando a camada superior para análise das regiões A, B e C, e outra com um corte transversal para análises das regiões P1, P2 e P3. Em seguida, estas amostras foram embutidas utilizando uma resina de embutimento a quente fenólica. Então, elas foram lixadas com lixas de granulometria 120, 400, 600 e 1200 mesh, e por fim realizou-se o polimento das mesmas com pasta de diamante com granulometria de 1  $\mu\text{m}$ . A forma final das amostras, para as análises nos dois tipos de cortes, pode ser observada nas Figuras 10 e 11.

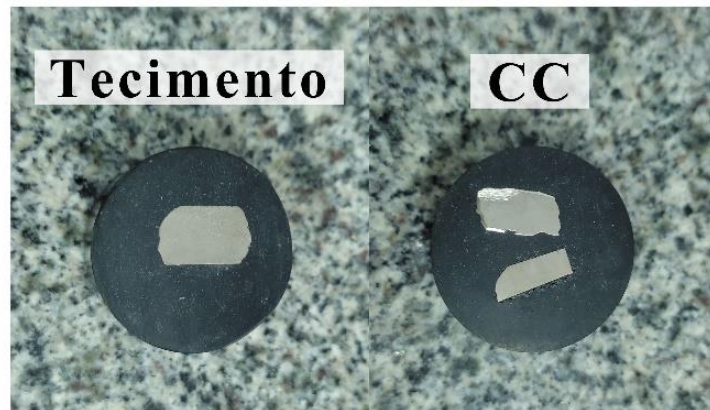
Para o procedimento de ataque químico, as amostras foram imergidas por 20 segundos em Água Régia (8 ml  $\text{HNO}_3$  + 12 ml  $\text{HCl}$  + álcool etílico). Em seguida, as amostras foram lavadas com álcool etílico e secas a quente. Para a realização da microscopia, com o intuito de obtenção das imagens das microestruturas, foi utilizado o microscópio Axio da marca Zeiss, modelo Imager.M2m.

Figura 10 – Amostras das peças embutidas e lixadas para análise das regiões A, B e C



Fonte: Próprios Autores.

Figura 11 – Amostras das peças embutidas e lixadas para análise das regiões P1, P2 e P3



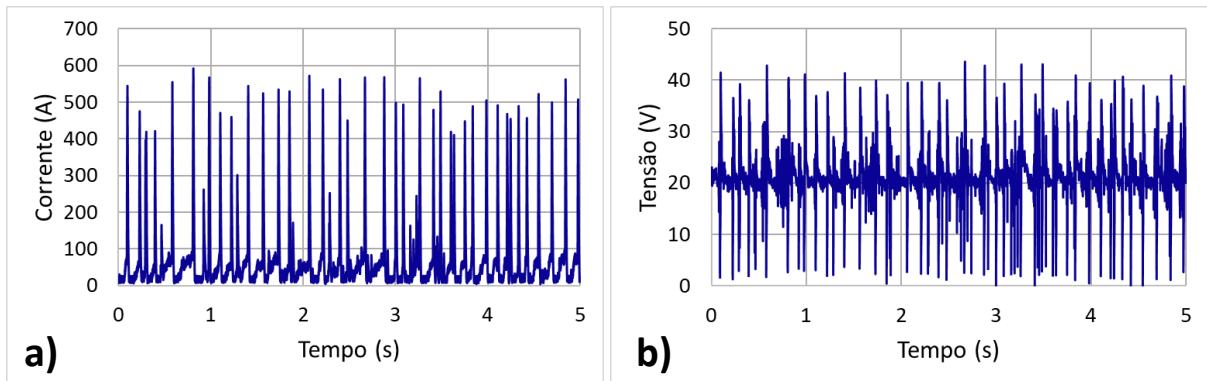
Fonte: Próprios Autores.

## RESULTADOS

### Análise dos parâmetros de soldagem

A Figura 12 apresenta gráficos da corrente e tensão de soldagem pelo tempo, obtidos durante os ensaios, a fim de se analisar como se comportam estes parâmetros durante os curtos-circuitos no processo FCAW. Nota-se que ocorrem curtos durante a soldagem pois a corrente, Figura 12(a), aumenta muito e tem seu valor levado próximo de zero abruptamente, tendo seu valor médio de 71 A. Já a tensão de soldagem, Figura 12(b), se mantém próximo de seu valor médio que foi programado na fonte de 20 V.

Figura 12 - a) gráfico de corrente (A) pelo tempo (s); b) gráfico de tensão (V) pelo tempo (s)

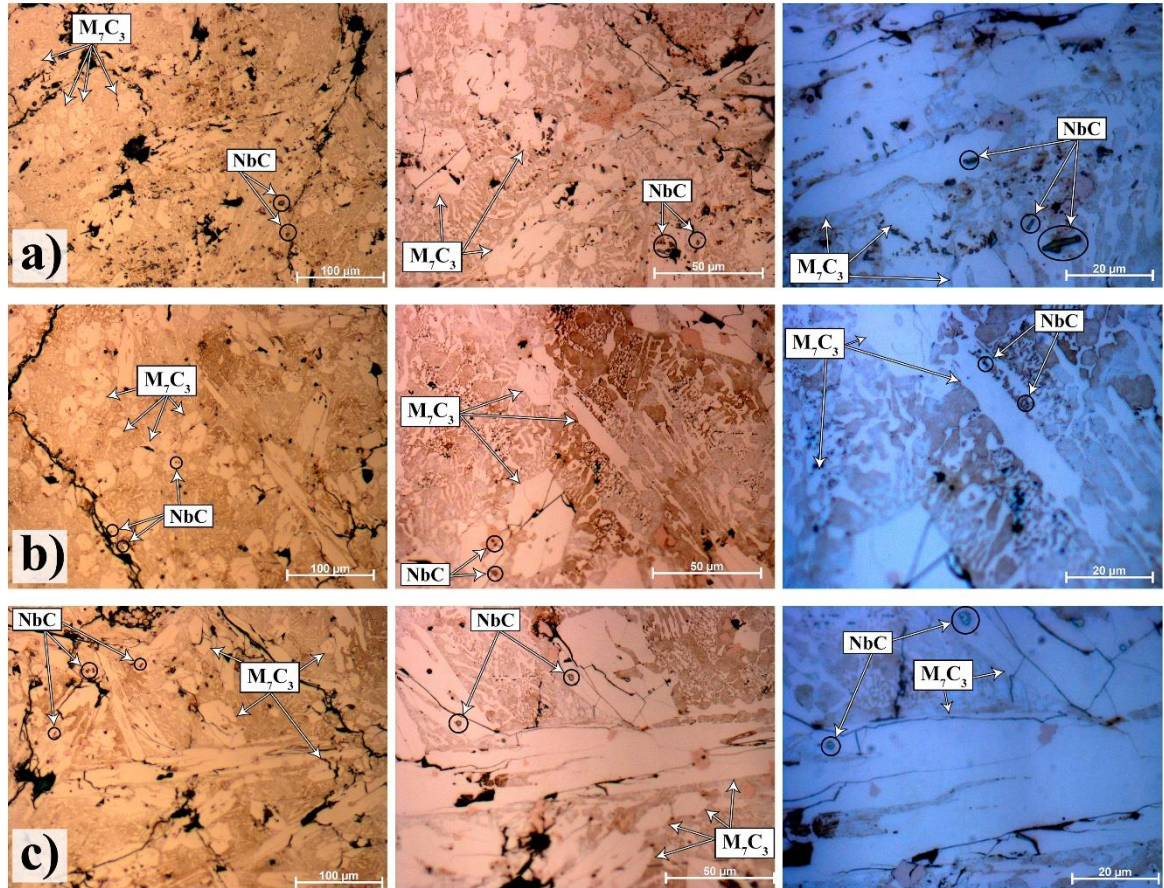


Fonte: Próprios Autores.

### Análise das microestruturas

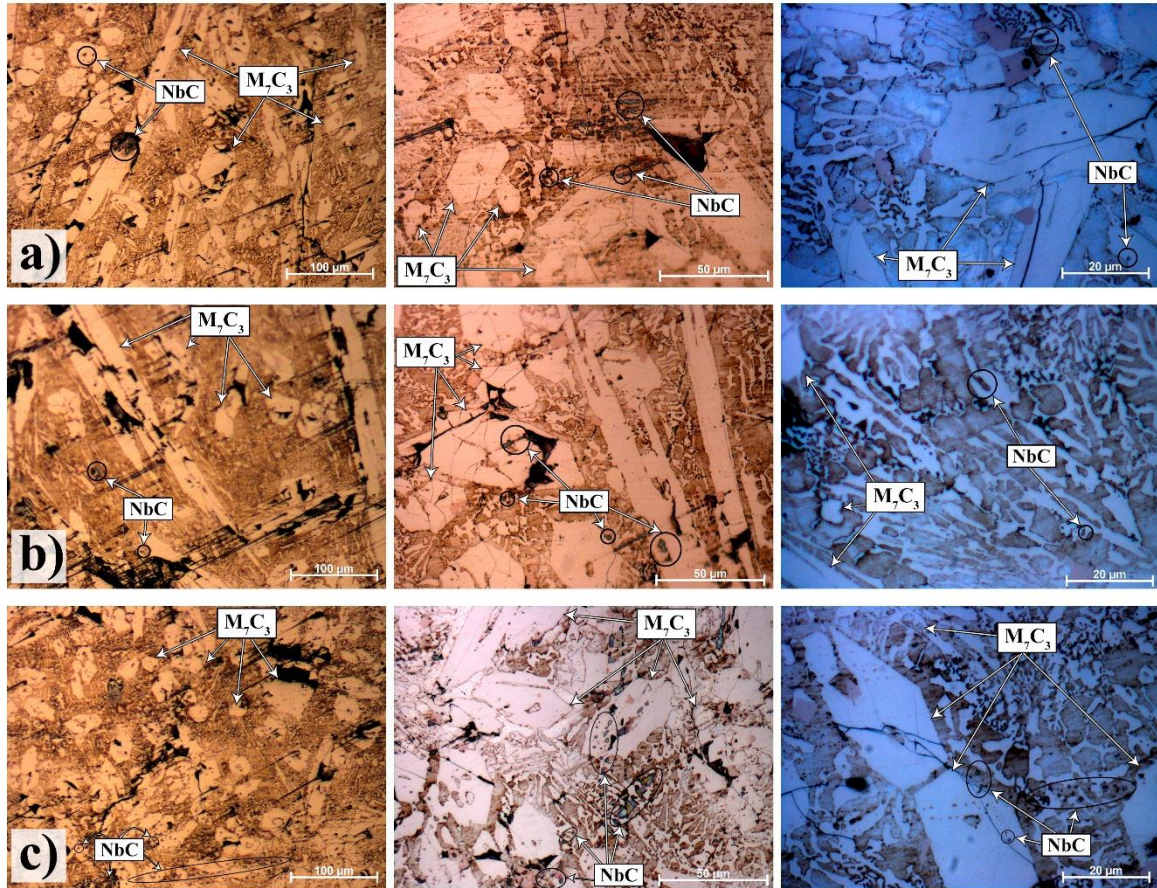
As microestruturas que se podem notar no material FeCrC+Nb, utilizando o arame com os teores de elementos apresentados na Tabela 1, foram também observadas por SOUZA e FERRARESI (2017) e também por MARQUES, FERRARESI e SOUZA (2023), sendo possível notar em seus trabalhos microestruturas de morfologia hexagonal e em forma de agulha bem perceptíveis que são carbonetos primários  $M_7C_3$ , sendo formadas por austenita em uma matriz eutética com alto teor de Cromo, além da presença de carbonetos de Nióbio NbC. As Figuras 13 e 14 apresentam provavelmente tais carbonetos nas 3 regiões distintas A, B e C de ambas as roldanas, nas Figuras 15 e 16 também apresentam nas 3 regiões distintas P1, P2 e P3, mas análises complementares em MEV e DRX seriam necessárias para confirmação dessas formações, apesar das microestruturas demonstrarem compatibilidade visual com os trabalhos de SOUZA e FERRARESI (2017) e de MARQUES, FERRARESI e SOUZA (2023).

Figura 13 – Microestruturas presentes no FeCrC+Nb obtidas pelo processo FCAW com trajetória de círculos concêntricos. Tem-se ampliações de 200x, 500x e 1000x, respectivamente, para as medições nas regiões: a) A; b) B; c) C



Fonte: Próprios Autores.

Figura 14 – Microestruturas presentes no FeCrC+Nb obtidas pelo processo FCAW com trajetória de tecimento. Tem-se ampliações de 200x, 500x e 1000x, respectivamente, para as medições nas regiões: a) A; b) B; c) C



Fonte: Próprios Autores.

A Figura 13 apresenta os resultados de microestrutura da roldana revestida com trajetória CC, nas regiões A, B e C. A região que apresenta visualmente maior proporção de carbonetos é a região B, tendo em vista que os carbonetos  $M_7C_3$  e NbC são carbonetos de elevada dureza, segundo o ensaio de microdureza apresentado posteriormente e também WANG e LI (2010, apud LUZ, et. Al. 2020), tal arranjo justifica o aumento de dureza na região B em relação às outras regiões para amostra de trajetória de CC.

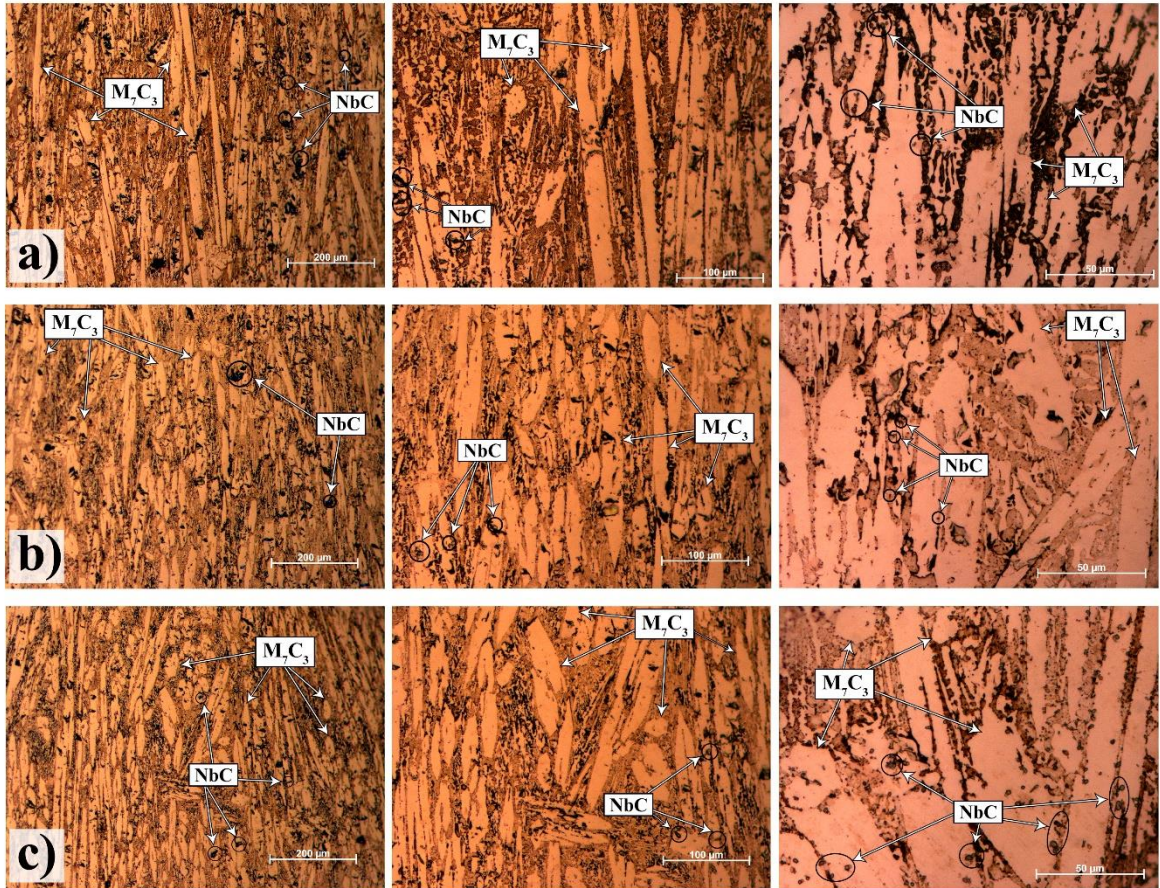
Para a roldana feita com trajetória de tecimento, a região C, Figura 14(c), apresenta os carbonetos  $M_7C_3$  e NbC visualmente em maior proporção, se comparada a região A e B, Figura 14(a-b). O que justifica a região C apresentar a maior dureza em relação às demais regiões, Figura 17.

Fazendo uma comparação entre as regiões de ambas as roldanas, nota-se visualmente que para a região A, Figura 8, o número de carbonetos  $M_7C_3$  e NbC é bastante parecido tanto na feita com trajetória de CC quanto de tecimento, Figura 13(a) e Figura 14(a). Pressupõe-se,

então, que este fato fez com que os valores de dureza para esta região em ambas as roldanas fossem relativamente próximos, Figura 17, sendo cobertos pelas suas incertezas. Para a região B, Figura 8, percebe-se visualmente que os carbonetos estão em maior proporção na trajetória de tecimento, Figura 14(b), do que na de CC, Figura 13(b). Isto fica mais evidente na ampliação de 500x e pressupõe-se que foi o principal fator para a diferença considerável de dureza entre as roldanas, Figura 17, para a região B. Analisando a região C, é perceptível que esta região na roldana feita com trajetória de tecimento, Figura 14(c), apresenta visualmente um número superior de carbonetos  $M_7C_3$  e também NbC, com uma proporção aparentemente maior, se comparada a mesma região na roldana feita com trajetória de CC, Figura 13(c). Esta diferença é notável e é validada nos ensaios de dureza, exposto na Figura 17. Uma possível justificativa para esse fenômeno é a maneira como foi distribuído o calor durante o processo de soldagem, refundindo o material mais vezes onde houve uma maior concentração da tocha de soldagem, que durante os ensaios notou-se que foi na região C durante o tempo de soldagem na trajetória por tecimento. Segundo o estudo de SOUZA (2023), a temperatura intercamadas afeta diretamente o valor da dureza em ligas de FeCrC, o que pode justificar a influência da distribuição de calor nos diferentes valores de dureza para cada região. A comparação entre as diferentes trajetórias também demonstra a maior presença de carbonetos NbC na roldana feita por trajetória de tecimento em contrapartida à feita com trajetória de CC.

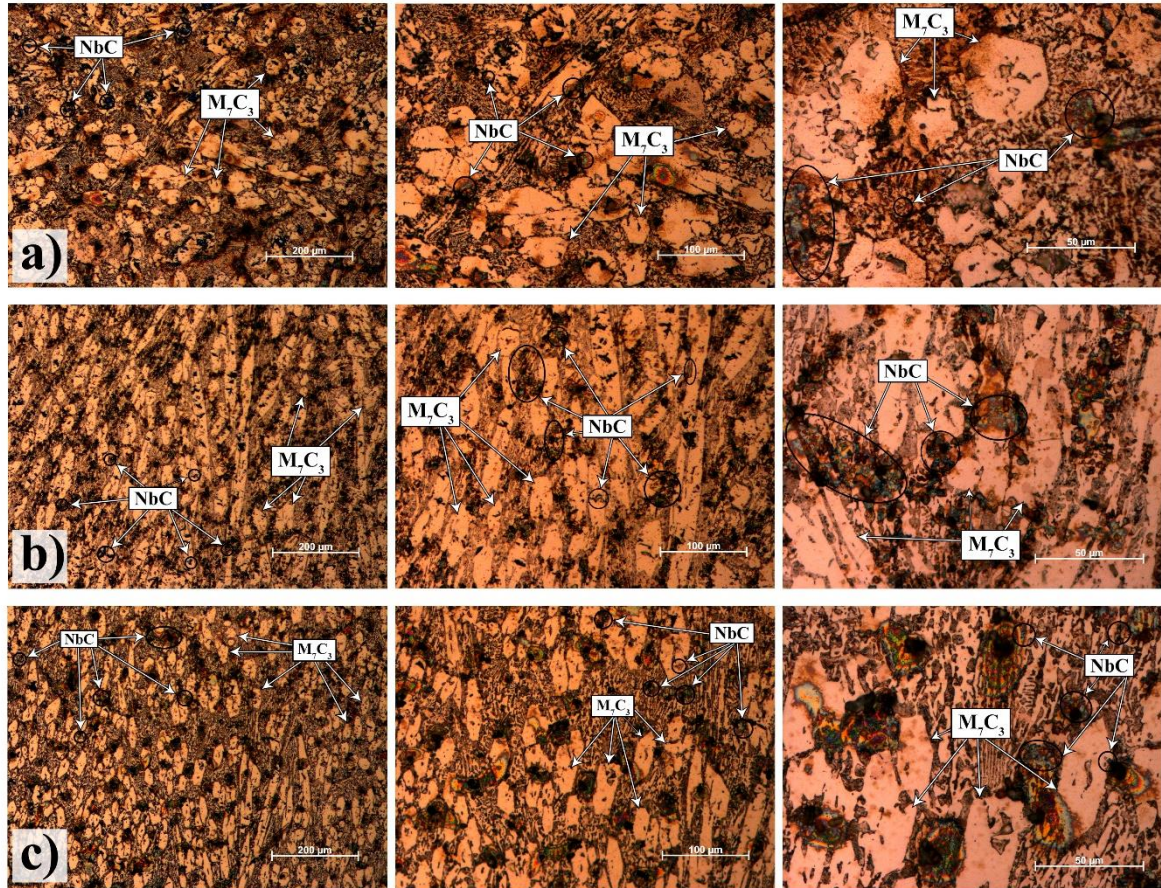
Nas Figuras 13 e 14 também é possível verificar trincas de contração ou de solidificação nas microestruturas dos carbonetos, devido a sua baixa ductilidade. Estas trincas também foram observadas por LUZ et. al. (2020), sendo trincas normalmente transversais que aliviam as tensões residuais do cordão de solda, e pela presença de Nb, que é um elemento nucleador e refinador de carbonetos, resultam em uma microestrutura mais refinada. Observa-se, pela microscopia, que os carbonetos  $M_7C_3$  da trajetória de tecimento, Figura 14, apresentam mais trincas se comparados com os da trajetória de CC, Figura 13. Para ensaios futuros a análise com líquido penetrante se vê interessante para maior esclarecimento.

Figura 15 – Microestruturas presentes no FeCrC+Nb obtidas pelo processo FCAW com trajetória de círculos concêntricos. Tem-se ampliações de 100x, 200x e 500x respectivamente, para as medições nas regiões: a) P1; b) P2; c) P3



Fonte: Próprios Autores.

Figura 16 – Microestruturas presentes no FeCrC+Nb obtidas pelo processo FCAW com trajetória de tecimento. Tem-se ampliações de 100x, 200x e 500x respectivamente, para as medições nas regiões: a) P1; b) P2; c) P3



Fonte: Próprios Autores.

A Figura 15 apresenta os resultados da microestrutura da roldana revestida com trajetória CC, nas regiões P1, P2 e P3. A região que apresenta visualmente maior proporção de carbonetos é a região P3. Tendo em vista que os carbonetos  $M_7C_3$  e NbC são carbonetos de elevada dureza, segundo o ensaio de microdureza e também WANG e LI (2010, apud LUZ, et. Al. 2020), esse arranjo microestrutural justifica o maior valor de dureza presente nesta região, Figura18. Ademais, nota-se que a região P2 apresenta visualmente os carbonetos em maior proporção comparando com a região P1, demonstrando que essa quantidade foi aumentando gradativamente entre as regiões P1, P2 e P3. A região P3 é a que fica mais perto do metal de base e a P1 mais longe, isso pode demonstrar que regiões que provavelmente receberam maiores quantidades de calor, fazendo com que o material fosse refundido por mais vezes, apresentam valores de dureza maiores. Pressupõe-se, então, que a maneira como é distribuído o calor ao longo do processo de soldagem é o fator de maior influência na dureza naquela região.

A Figura 16 apresenta os resultados de microestrutura da roldana revestida com trajetória de tecimento, nas regiões P1, P2 e P3. Nesta figura fica claro os contornos dos carbonetos e sua grande proporção se comparada às Figuras 13, 14 e 15. A região P3 apresentou, visualmente, os carbonetos  $M_7C_3$  e NbC em maior proporção se comparada às regiões P1 e P2. Novamente, nota-se que a proporção desses carbonetos foi aumentando entre as regiões P1, P2 e P3. O número visualmente maior de carbonetos em comparação a todas as demais regiões, tanto de  $M_7C_3$  quanto de NbC, comprova os valores de dureza presentes na Figura 18, como sendo os maiores encontrados entre ambas as roldanas.

A formação dos carbonetos possivelmente demonstra que a maneira como o calor é distribuído no processo de tecimento, com a tocha fazendo movimentos que mantêm o bico por mais tempo em uma região para completar seu movimento, pode ter afetado diretamente a dureza nestas regiões. Como analisado no trabalho de SOUZA (2023), a temperatura intercamadas, ou seja, presente na superfície da camada após a sua solda e antes de ser feita a camada acima dela, afeta diretamente o valor de dureza da peça final, isso pode demonstrar que a distribuição de temperatura faz com que as camadas abaixo aqueçam e esfriem mais vezes do que as de cima, o que pode refundir o material da camada abaixo mais vezes que nas acima, tornando esta camada mais dura, o que se comprova nos ensaios realizados neste trabalho e com resultados na Figura 18.

Por fim, a análise das microestruturas de todas as regiões das roldanas, feitas com trajetórias de soldagem diferentes, revela que na maioria das regiões comparadas, a trajetória de tecimento apresenta uma formação de carbonetos  $M_7C_3$  e NbC em maior proporção se comparando com a trajetória de círculos concêntricos. Este fato forneceu valores de dureza maiores a trajetória de tecimento, assim como também foram analisadas estas microestruturas nos ensaios realizados por WANG e LI (2010, apud LUZ, et. al. 2020) e por MARQUES, FERRARESI e SOUZA (2023).

Nas Figuras 15 e 16 é possível verificar trincas de contração ou de solidificação nas microestruturas dos carbonetos, devido a sua baixa ductilidade, assim como nas Figuras 13 e 14. Observadas por LUZ et. al. (2020), são trincas normalmente transversais que aliviam as tensões residuais do cordão de solda, e pela presença de Nb, que é um elemento nucleador e refinador de carbonetos, resultam em uma microestrutura mais refinada.

### Ensaio de dureza e microdureza

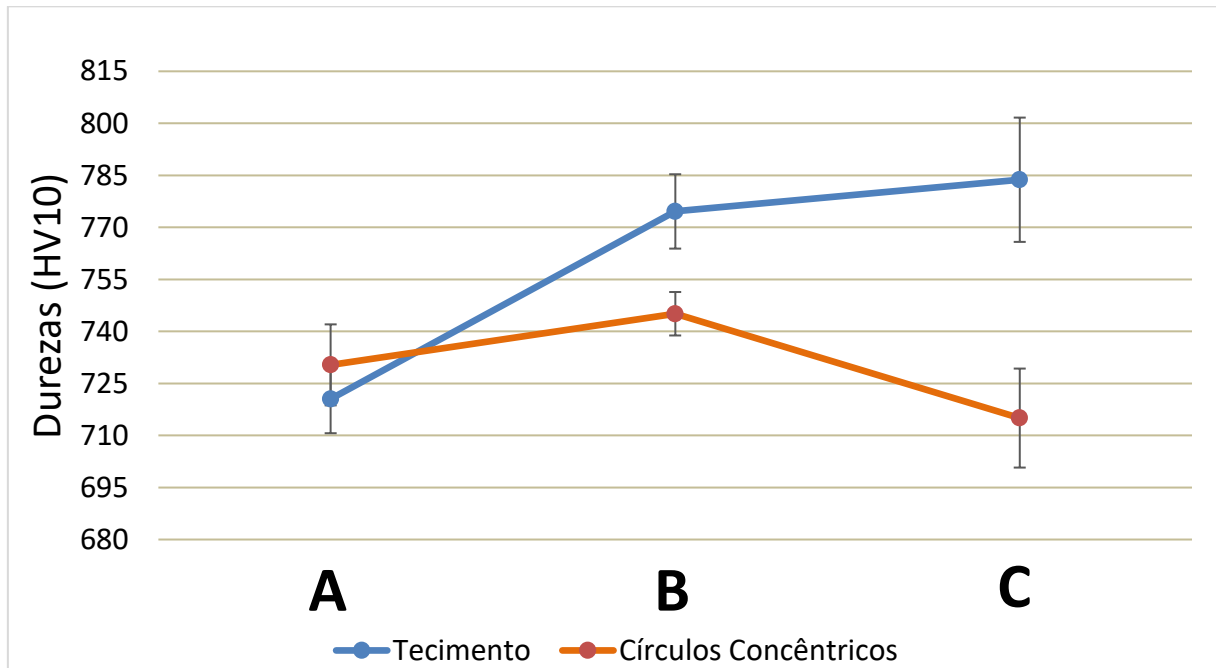
No ensaio de microdureza, o carboneto primário de cromo  $M_7C_3$ , apresentou dureza de  $(1274 \pm 155)$  HV, o que está de acordo com a literatura (WANG e LI, 2010, apud LUZ, 2020), enquanto a matriz eutética possui uma dureza de  $(763 \pm 75)$  HV. Para averiguar a microdureza do carboneto de nióbio é necessário um ensaio de nanodureza, entretanto, segundo WANG e LI (2010, apud LUZ, et. Al. 2020), a dureza do NbC é de até 2500 HV.

Utilizando o método de medição de dureza apresentado, foram obtidos os valores médios de dureza referentes a cada uma das regiões, A, B e C, apresentadas na Figura 8. Temos que, para a roldana feita com Trajetória de Círculos Concêntricos, o valor médio da dureza na região A foi de  $(730,4 \pm 11,7)$  HV10; para a região B foi de  $(745,1 \pm 6,3)$  HV10; e para a região C  $(715,0 \pm 14,3)$  HV10. Para a roldana feita com Trajetória de Tecimento, temos na região A o valor médio de  $(720,5 \pm 9,9)$  HV10 para a dureza; na região B  $(774,6 \pm 10,7)$  HV10; e para a região C  $(783,7 \pm 17,9)$  HV10. A Figura 17 apresenta um gráfico demonstrando a relação entre as diferenças nas durezas das roldanas, a depender do tipo de trajetória e da região de análise. O comportamento da dureza na trajetória de tecimento sucede um aumento gradual da mesma, já na trajetória de círculos concêntricos ocorre um leve aumento da dureza, na região B, seguido de uma queda.

Notou-se, Figura 17, que para a região A não se tem diferença entre as medições, pois as incertezas se chocam, já em B a diferença entre as durezas passa a ser significativa e em C esta diferença é bastante considerável. Por resultado, tem-se que a trajetória de tecimento apresentou durezas maiores do que a trajetória de círculos concêntricos nas regiões B e C, sendo estatisticamente igual nas extremidades externas das roldanas.

Comparando os resultados com o estudo feito por SOUZA (2023), onde foi feita uma pré-forma com um processo semelhante ao de manufatura da roldana feita com trajetória de CC e com uma liga de FeCrC porém com adição de Titânio (Ti) ao invés de Nióbio, onde o robô fez várias camadas sem parar, os valores encontrados para a dureza se assemelham. Os ensaios realizados utilizaram o durômetro Mitutoyo HV-100 com força de 30 kgf. Os valores de dureza encontrados variaram entre 713,7 HV e 739,4 HV, estando os valores da roldana entre 715,0 HV e 745,1 HV. Tendo em vista que os ensaios de dureza nas pré-formas (SOUZA, 2023) foram feitos nas mesmas condições e regiões dos realizados na roldana, a semelhança entre os valores demonstra uma certa assertividade nos métodos utilizados, apesar das peças serem manufaturadas com ligas de FeCrC diferentes.

Figura 17 – Gráfico de comparação das durezas nas regiões A, B e C das roldanas variando as trajetórias



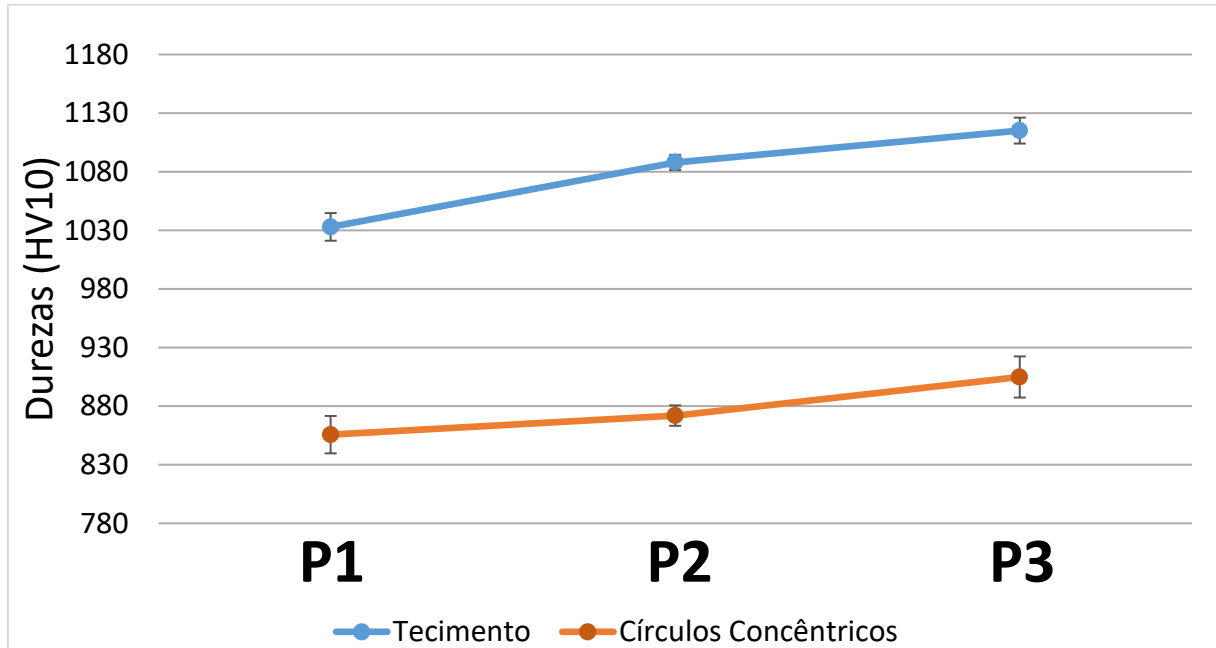
Fonte: Próprios Autores.

Ademais, foram obtidos os valores de dureza nas regiões, P1, P2 e P3, descritas na Figura 9, utilizando o método de medição de dureza apresentado. Para a trajetória de Círculos Concêntricos, o valor médio da dureza na região P1 foi de  $(855,7 \pm 15,9)$  HV10; para a região P2 o valor foi de  $(872,0 \pm 8,7)$  HV10; e para a região P3 foi obtido  $(904,9 \pm 17,6)$  HV10. Para a trajetória de Tecimento, o valor médio obtido na região P1 foi de  $(1032,9 \pm 11,8)$  HV10; para a região P2 foi de  $(1087,9 \pm 6,5)$  HV10; e para a região P3  $(1115,1 \pm 11,1)$  HV10. A Figura 18 apresenta um gráfico que demonstra a relação do crescimento dos valores de dureza no decorrer das regiões da mesma roldana, além da diferença entre os valores de dureza nas mesmas regiões mas nas roldanas feitas com trajetórias diferentes. Ambas as trajetórias apresentaram aumento no valor da dureza ao longo das camadas, quanto mais elas se aproximavam do metal de base (substrato), sendo a região P3 a mais perto do substrato, Figura 9. Logo, as duas roldanas apresentaram uma tendência de aumento da dureza de uma extremidade a outra, o que pode ter sido causado devido à distribuição do calor durante toda a manufatura da roldana, onde as camadas perto do substrato podem ter recebido mais calor durante o tempo de manufatura, refundindo cada vez mais o material.

Analisando a Figura 18, nota-se que a trajetória de tecimento apresentou valores significativamente maiores de dureza nas 3 regiões, P1, P2 e P3, se comparada com a trajetória de círculos concêntricos. Então, como resultado, tem-se que a trajetória de tecimento apresentou

durezas maiores do que a de círculos concêntricos em todas as camadas de deposição que foram ensaiadas, tendo valores significativamente distantes.

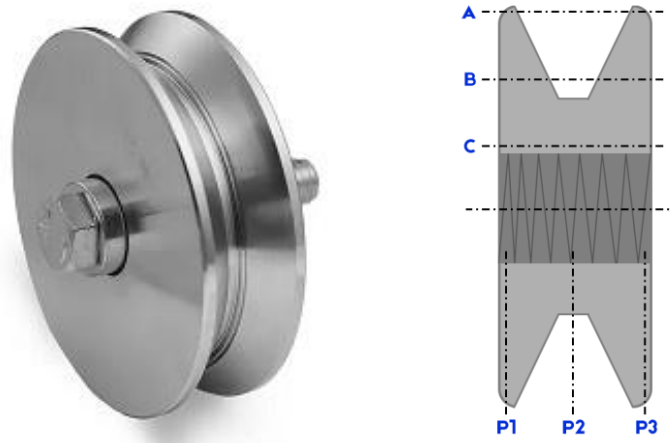
Figura 18 – Gráfico de comparação das durezas nas regiões P1, P2 e P3 das roldanas variando as trajetórias



Fonte: Próprios Autores

As roldanas manufaturadas necessitam de usinagens complementares para adicionar uma extrusão na região central onde irá passar o elemento que a mesma irá rolar sobre, como por exemplo uma barra de rolagem. As Figuras 19(a) e 19(b) trazem a ideia de como ficaria essa região, sendo notável que as laterais da roldana são usinadas até uma região perto do furo central da roldana. Esta condição demonstra que a região onde acontecerá o maior desgaste devido ao atrito, pois é onde a roldana tem o maior contato com o elemento de rolagem, haverá uma maior dureza por ser na região P2, Figura 19(b), onde os valores de dureza são bastante superiores aos valores obtidos na superfície mais distante da base, onde foram feitos os ensaios das regiões A, B e C. E também é possível tomar como hipótese que a região onde a extrusão mais se aproxima do furo roscado, e também onde mais irá ter o contato da roldana com o elemento de rolagem, fica entre as regiões B e C, o que demonstra que o valor de dureza também será maior nesta região. Logo, a junção entre as regiões P2 e entre B e C dará ao ponto de contato roldana – elemento de rolagem uma dureza elevada. Esse fator aumenta ainda mais a vida útil da peça, reduz o desgaste e contribui para a validação da técnica de MADA utilizando FCAW para a fabricação de roldanas de FeCrC.

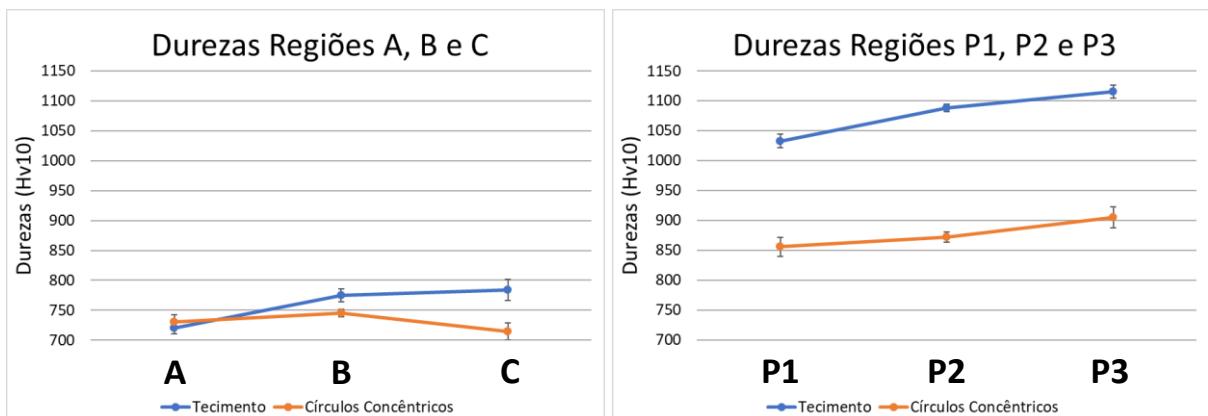
Figura 19(a) e Figura 19(b) – Roldana com a extrusão para encaixe no elemento de rolagem



Fonte: Adaptado de Plasto Center (2021) e Próprios Autores.

A Figura 20 apresenta os gráficos de comparação das durezas tanto nas regiões A, B e C quanto nas regiões P1, P2 e P3, nas mesmas escalas. Nesta comparação, é notável a diferença nos valores obtidos nos ensaios de dureza entre a superfície onde foram obtidas as durezas nas regiões A a C se comparada com as demais camadas de soldagem, o que demonstra as regiões P1 a P3. Essa grande diferença de valores provavelmente é causada devido a direção de crescimento dos grãos, porém análises complementares são necessárias para confirmar.

Figura 20 – Comparação gráfica entre as durezas nas diferentes regiões, colocadas na mesma escala para melhor visualização



Fonte: Próprios Autores.

## Conclusão

Com base nos resultados observados nesse trabalho concluiu-se que:

- Em relação a dureza, observou-se durezas mais elevadas nas peças fabricadas com trajetória de tecimento do que nas fabricadas com círculos concêntricos, chegando a uma diferença de 35,88% entre a menor dureza encontrada na CC (715 HV10) e a maior encontrada na de tecimento (1115,1 HV10). A amostra de trajetória de tecimento apresentou durezas maiores nas regiões B e C, e valor de dureza estatisticamente igual na região A, se comparada com a roldana feita com trajetória de círculos concêntricos (CC). A trajetória de tecimento apresentou um aumento gradual das durezas nas regiões. Já na amostra com trajetória de CC, a região de maior dureza foi o centro da roldana, e nela a região C ainda apresentou um valor de dureza maior do que a região A. Para os ensaios feitos em um corte transversal, ambas as roldanas apresentaram aumento gradativo de dureza entre as regiões P1, P2 e P3, quanto mais se aproximava do substrato (região P3), ao longo das camadas. A trajetória de tecimento apresentou valores consideravelmente superiores à de CC em todas as 3 regiões.
- Em relação a microestrutura, observou-se que quanto maior a dureza em determinada região, sendo ela com trajetória de tecimento ou CC, maior é visualmente o número de carbonetos primários  $M_7C_3$  e NbC, além do espaçamento entre os mesmos diminuir. A trajetória de tecimento apresentou visualmente maior quantidade de trincas se comparada a trajetória de CC. Ademais, notou-se que provavelmente a direção de crescimento dos grãos causou a diferença entre os valores obtidos nos ensaios feitos na superfície das roldanas com os feitos transversalmente.
- Para a liga de FeCrC+Nb, provavelmente a melhor situação é a utilização de uma trajetória de tecimento por fornecer maior dureza à peça (roldana), principalmente nas regiões onde a roldana fica em contato com o elemento de rolagem.
- Sugere-se, como trabalhos futuros, a realização de ensaios de desgaste, preferencialmente na direção transversal, realizar um ensaio de nanodureza para averiguar a dureza do carboneto de nióbio NbC, realizar ensaios para análise do crescimento dos grãos e fazer um estudo da trajetória de círculos concêntricos invertendo a ordem que os círculos são feitos, de dentro para fora.

## Agradecimentos

Agradecimentos ao Programa de Educação Tutorial, ao Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação, ao meu orientador, a minha família, a meu pastor, a meus amigos da turma 11 e aos técnicos e professores da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás.

## Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM E 92 – 82 (Reapproved 2003): **Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials**. United States, 2003.

DING, D., PAN, Z., CUIURI, D., LI, H., DUIN, S., LARKIN, N. **Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing**. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 39, 2016, p. 32-42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.12.004>.

ESAB BRASIL. **Soldagem MIG/MAG**. ESAB Br, 2005. E-book. Disponível em: <https://www2.ufjf.br/profab//files/2016/09/ESAB-Apostila-MIG-MAG.pdf>. Acesso em: 18 out. 2021.

GIOTTI, F. **Manufatura aditiva por deposição a arco: uma análise crítica da tecnologia e perspectivas para o futuro**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/217365/001120911.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 07 set. 2023.

KANNAN, T., MURUGAN, N. Effect of flux cored arc welding process parameters on duplex stainless steel clad quality. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 176, 2006, p. 230-239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.157>

LI, Z., CUI, Y., WANG, J., LIU, C., WANG, J., XU, T., LU, T., ZHANG, H., LU, J., MA, S., FAN, H., TANG, S. Characterization of Microstructure and Mechanical Properties of Stellite

6 Part Fabricated by Wire Arc Additive Manufacturing. **MDPI - Journal Metals**, v. 9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/met9040474>

LIMA, A. C. **Estudo da aplicação de revestimento duro por soldagem com arames tubulares quanto à resistência ao desgaste de facas picadoras de cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2008.

LIU, J., YANLING, X., GE, Y., HOU, Z., CHEN, S. **Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments**. Londres: Springer-Verlag Ltda, 2020.

LUZ, A.H.S., TEIXEIRA, F.R., JUNIOR, M.A.B.P., MOTA, C.A.M., et al. Aspectos microestruturais e do comportamento mecânico de revestimento duro depositado pelo processo arame tubular. **Revista Matéria**, v. 25, 2020. Disponível em: <<https://revistas.ufrj.br/index.php/rm/article/view/37051/20270>>. Acesso em: 30 jan, 2023.

MARQUES, P. V., MODENESI, P. J., BRACARENSE, A. Q. **Soldagem – Fundamentos e Tecnologia**. Editora UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2005.

MARQUES, V., FERRARESI, V., SOUZA, D. **Análise microestrutural de revestimento duro aplicado pelo processo FCAW com adição de arame não energizado**. Brazillian Congress on Manufacturing Engeneering, 2023, Brasília.

MOHAMAT, S., IBRAHIM, I., AMIR, A., GHALIB, A. The Effect of Flux Core Arc Welding (FCAW) Processes On Different Parameters. **Procedia Engineering**, v.41, 2012, p. 1497-1501. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.341>

PARANHOS, R. P.R. Especialista fala da importância da soldagem para o setor. **Jornal ProCana**, 2010. Disponível em: <<https://jornalcana.com.br/especialista-fala-da-importancia-da-soldagem-para-o-setor>>. Acesso em: 07 set. 2023.

PLASTO CENTER. **010200 roldana 1½” canal em (v) em aço 1020 com eixo furado e rolamento**. 2021. 1 fotografia. Disponível em:

<<https://www.plastocenter.com/produto/010200-roldana-1%C2%BD-canal-em-v-em-aco-1020-com-eixo-furado-e-rolamento/>>. Acesso em 11 set. 2023.

RAMLAB – Metal parts on demand. **MaxQ WAAM repair welding Tekengebied 1 kopie**. 2021. 1 fotografia. Disponível em: <[https://www.ramlab.com/wp-content/uploads/2021/03/MaxQ-WAAM-REPAIR-WELDING\\_Tekengebied-1-kopie.jpg](https://www.ramlab.com/wp-content/uploads/2021/03/MaxQ-WAAM-REPAIR-WELDING_Tekengebied-1-kopie.jpg)>. Acesso em 05 set. 2023.

RAMLAB – Metal parts on demand. **WAAM Peller**. 2017. 1 fotografia. Disponível em: <<https://www.ramlab.com/wp-content/uploads/2017/12/WAAMPeller.jpg>>. Acesso em 05 set. 2023.

SAUNDERS, S. **Using Robotic GMAW Additive Manufacturing to Make Metal Components for Industrial Applications**. Mar. 2020. 1 ilustração. Disponível em: <<https://3dprint.com/264845/robotic-gmaw-am-to-make-metal-components-for-industrial-applications/>>. Acesso em 07 set. 2023.

SILVA, P., SANTANDREA, R., BRANDÃO, L., XAVIER, M., VOLPINI, V. Manufatura aditiva: Revisão sistemática da literatura. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 11, p. 84502-84515, nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n11-023>

SILVA, H., FERRARESI, V. **Effect of cobalt alloy addition in erosive wear and cavitation of coatings welds**. Elsevier B.V., 2019.

SOUZA, D. D. B. G, FERRARESI, V. A. Aplicação de revestimento duro utilizando o processo FCAW duplo arame para diferentes tipos de consumíveis utilizados na indústria sucroalcooleira. **Revista Matéria**, v. 22, 2017. Disponível em: <<https://revistas.ufrj.br/index.php/rm/article/view/13705/9358>>. Acesso em: 07 set. 2023.

SOUZA, G. **Efeito da temperatura de intercamada na microestrutura De ligas a base de FeCr na fabricação de pré-formas via manufatura aditiva por deposição à arco (MADA)**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Goiás, 2023.

TRIMETAIS. **Aço A36**: o que é aço A36?. Disponível em:  
<<https://trimetais.com.br/materiais/aco-a36/>>. Acesso em: 20 set. 2023

VOLPATO, N. **Manufatura aditiva: tecnologia e aplicações da impressão 3D**. Editora Edgard Bluncher Ltda, 2017. Disponível em:  
<<https://books.google.com.br/books?id=ni9dDwAAQBAJ&lpg=PA4&hl=pt-BR&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>>. Acesso em 07 set. 2023.

## APÊNDICES



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

## DECLARAÇÃO

### PLANO DE TRABALHO DO PROJETO FINAL DE CURSO

Título do Trabalho

**Avaliação do efeito da trajetória na fabricação de roldana de FeCrC pelo processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco**

**Orientador: Demostenes Ferreira Filho**

**Co-orientador: -**

Curso

Engenharia Elétrica ( )	Engenharia Mecânica ( X )	Engenharia de Computação PFC 1 ( )      PFC 2 ( )
-------------------------	---------------------------	--

Dados	Discente 1
Matrícula - Nome	201905724 - Lúcio Mateus Santana Carvalho
Telefone	(62) 983302944
E-mail	luciocarvalho@discente.ufg.br

A manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) utiliza de processos de soldagem para a criação de diversos objetos e peças por meio de transferências metálicas. A MADA é a preferida das indústrias por moldar uma variedade de materiais metálicos, ter alta eficiência de deposição e por possibilitar a construção de estruturas complexas, porém ainda não possui uma maturidade suficiente para ser aplicada industrialmente, demandando estudos para melhor entendimento do processo. Neste sentido, este projeto terá como finalidade analisar o efeito da trajetória de fabricação, utilizando tecimento e círculos concêntricos (CC), na microestrutura e dureza de roldanas fabricadas em FeCrC-Nb (UTP AF Ledurit 68) pelo processo MADA.

#### I. Objetivos.

Os objetivos deste projeto são:

- Avaliar os efeitos de parametrização do processo MADA variando-se a trajetória de preenchimento;
- Analisar os efeitos da trajetória de preenchimento na Microestrutura e dureza de roldanas fabricadas pelo processo MADA.

#### II. Metodologia (atividades a serem desenvolvidas).

A metodologia utilizada neste projeto será:

- Realizar revisão bibliográfica;
- Parametrizar a deposição de FeCrC-Nb para uma condição adequada para o processo MADA;
- Parametrizar a trajetória de deposição utilizado uma célula robotizada;
- Avaliar o efeito da trajetória de deposição no perfil da peça;
- Avaliar o efeito da trajetória de deposição na microestrutura e dureza da peça;
- Analisar os resultados e escrever a monografia.

### III. Resultados Esperados

Espera-se como resultados um maior entendimento do processo MADA com aplicações de FeCrC-Nb, verificando-se o efeito da trajetória de deposição na microestrutura e dureza de roldanas fabricadas pelo processo MADA.

### IV. Cronograma de Atividades

Na Tabela 1 é mostrado o Cronograma de Atividades.

Tabela 1 - Semestre letivo 2023/03

<b>Etapas do Projeto</b>	<b>Agosto</b>	<b>Setembro</b>
1 - Revisão bibliográfica	x	x
2 - Parametrizar da deposição de FeCrC-Nb pelo processo MADA	x	x
3 - Parametrização da trajetória de deposição utilizado uma célula robotizada	x	x
4 - Avaliação do efeito da trajetória de deposição no perfil da peça	x	x
5 - Avaliação do efeito da trajetória de deposição na microestrutura e dureza da peça	x	x
6 - Confeção da Monografia	x	x
7 - Defesa do PFC	x	x



Documento assinado eletronicamente por **Demóstenes Ferreira Filho, Professor do Magistério Superior**, em 28/08/2023, às 15:28, 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](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3999223** e o código CRC **A31117C3**.