

# CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL EM PEÇA DE AÇO CARBONO IMPRESSA POR MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA)

Lucas Santos Garreto; Ferdinando Marco Rodrigues Borges; Rafael Pereira Ferreira;

## 1. Resumo

A Fabricação Aditiva por Deposição a Arco constitui um método de produção no qual o calor é gerado por meio de um arco elétrico, enquanto o material é depositado em camadas sucessivas para formar um componente. Embora essa tecnologia tenha sido proposta e investigada por algum tempo, sua notoriedade aumentou significativamente com a disseminação da impressão 3D e a ascensão da indústria 4.0. Ao realizar uma análise histórica e examinar estudos contemporâneos sobre o tema, é evidente que, apesar da transição mais direta entre o projeto assistido por computador (CAD) e a produção, além dos benefícios na otimização de recursos e exemplos de bem-sucedidos de componentes, persistem alguns desafios que limitam a ampla adoção desse processo. Entre esses desafios, destacam-se a presença de anisotropia nas propriedades mecânicas, a precisão dimensional limitada e a produção restrita.

Palavra-chave: MADA; Caracterização; Anisotropia; Microestrutura; Resistência mecânica;

## 2. Introdução

A fabricação de peças com variados tipos de materiais, inclusive os metálicos, de forma integrada, rápida e acessível foi possível a partir da Manufatura Aditiva (MA). A associação do controle de parâmetros, diversidade de modelos computacionais e economia de matéria-prima permitiu a produção de produtor mais leves, adequados para diversos setores da indústria, como os aeroespaciais, gerando uma boa relação custo-benefício (Gomes e Barbosa, 2020). A norma ISO/ASTM 52900 (ISO ASTM, 2015) destaca 4 métodos de impressão de componentes aplicáveis aos metais, como exemplo destaca-se o sistema *Direct Energy Deposition* (DED).

A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) é um processo proveniente do sistema *Direct Energy Deposition*, que associa a adição de material (MA) através de processo de soldagem (HACKENHAAR, 2020). A fabricação das peças é obtida através

da sobreposição de camadas sucessivas, onde o arame é depositado, geralmente no metal base, e dessa forma através da soldagem a arco, obtém-se a impressão (KÖHLER et al, 2019). Existem diversas opções para arcos elétricos, entre os quais podemos citar o GMAW (MIG/MAG), que usa o arame como eletrodo que se consome e o arco elétrico se forma entre o material de base e o eletrodo.

Uma adaptação do processo de soldagem GMAW (MIG/MAG) foi desenvolvido pela empresa Fronius, que é a produção de peças via CMT (*Cold Metal Transfer*) e se caracteriza pelo controle da transferência por curto-circuito (FRONIUS, 2017). Este método garante a atuação em ciclos quentes e frios, entretanto os ciclos térmicos ocasionam nas peças impressas variados graus de anisotropia, caracterizados por diferentes tamanhos de grãos, diversas fases e propriedades mecânicas variadas. Dessa forma, é essencial a caracterização de peças impressas por MADA via CMT a fim de verificar a anisotropia no plano e na direção de construção.

Alguns requisitos de projetos para fabricação de peças são as propriedades mecânicas, que possuem fator de relevância elevado. A presença de anisotropia pode invalidar o uso de determinados componentes em algumas aplicações. De acordo com os estudos de Williams, et al., (2016) as tensões residuais representam uma dificuldade para o processo. O arco com a entrada de calor significativa resulta em alta tensão residual causando distorções na peça. Durante o resfriamento, ocorre o encolhimento da peça devido às tensões residuais e essas tensões são maiores ao longo da direção de deposição, o que altera a microestrutura da peça e suas propriedades mecânicas.

Para se analisar a microestrutura de um material, se faz necessário compreender que a estrutura de um material metálico depende das fases e suas transformações que ocorrem durante a solidificação. Fases cristalinas são formadas, no entanto, durante as formações, normalmente, os cristais formados possuem orientações diferentes. Além disso, praticamente todas as propriedades mecânicas são dependentes do tamanho de grão (COLPAERT, 2008, p. 26, 27 e 34). A peça objeto deste estudo foi fabricada através do arame ER70s-6, através do processo MADA via CMT.

O estudo da morfologia das peças impressas por Manufatura Aditiva (MA) possibilita a análise do tamanho de grão, e textura da amostra. Essa caracterização será para investigação microestrutural de peça em aço carbono fabricada a partir da MADA. Com isso será possível caracterizar e verificar as propriedades mecânicas desta

fabricação, possibilitando comparar os métodos de impressão 3D e correlacionar com as propriedades obtidas a partir da fabricação convencional dos metais. As principais variáveis a serem analisadas serão tamanho de grão e microdureza.

3. Metodologia

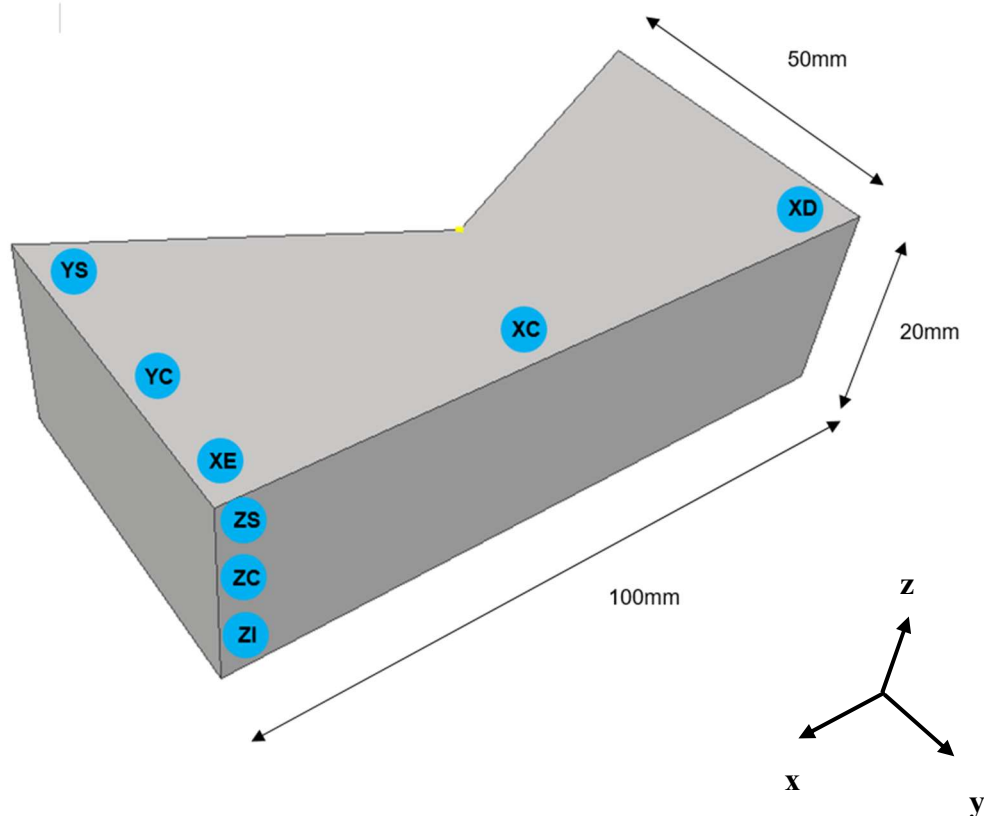
Os objetos de estudo selecionados para este trabalho tratam-se das deposições realizadas por Ferreira (2021) em seu estudo sobre a geometria de cordões fabricados por manufatura aditiva por deposição a arco via processo CMT. Para as deposições, foi utilizado o arame ER70S-6 cuja classificação é prevista pela American Welding Society (AWS) na norma A5.18, já as especificações quanto composição química estão expostas nas tabelas 1 nas quais as informações foram retiradas da ficha técnica da Böhler Welding:

Tabela 1 - Composição química do arame AWS A5.18 – ER70S-6 (Böhler Welding, 2022).

	C	Si	Mn
Wt. - %	0,07	0,85	1,50

A peça produzida possui as dimensões mostrada na figura 1, abaixo. Além disso, foram retiradas amostras ao longo do eixo x (amostras XE, XC e XD), do eixo Z (amostras ZS, ZI e ZC) e do eixo Y (XE, YC e YS), que também são descritas na mesma figura. Estas amostras foram utilizadas para caracterizar por EBSD e microscopia óptica, além de realizar o ensaio não destrutivo de microdureza.

Figura 1 - identificação da peça impressa por MADA e dos corpos de provas retirados.  
(FONTE: do próprio autor, 2024)



### 3.1. Microscopia óptica

Antecedendo a caracterização no microscópio óptico, realizou-se a preparação da superfície das seções transversais das amostras, respeitando as normas NBR 13284 (ABNT, 1995) baseada na norma ASTM E-3 (ASTM, 1995), com atualização em 2017 pela E3-11 (ASTM, 2017). Os processos são resumidos em: extração, embutimento a frio, lixamento, polimento e ataque químico. Foram utilizadas lixas d'água que iniciou na 80 e finalizou na 2000. O polimento se deu com alumina em suspensão, em 3 e 1  $\mu\text{m}$ . Já o ataque químico foi realizado utilizando Nital a 10%, com ataque durando de 3 a 5 segundos.

Uma vez que a preparação das amostras resultou na revelação da microestrutura, imagens foram geradas com o auxílio do do Microscópio óptico Zeiss Primotech. Buscou-se realizar imagens em pontos diferentes da peça, ao longo do eixo x, y e z, para verificar se a microestrutura tendia a ser diferente ao passo que as camadas eram depositadas.

### 3.2. Ensaio de microdureza

O teste de microdureza Vickers foi realizado utilizando o equipamento HMV-2 da Shimadzu com lentes de aproximação de 10x e 40x. Os parâmetros para o ensaio foram

retirados da NBR ISO 6507-1 (ABNT ISO, 2019) e foi realizado com duração de 15s para penetração, com carga aplicada de 4,9N.

Foram realizadas 10 indentações em regiões aleatórias com o objetivo de caracterizar mecanicamente pontos diferentes de cada amostra, indentando pontos com diferentes microestruturas.

#### 4. Resultados e Discussão

##### 4.1. Microdureza Vickers

Foram realizadas 10 indentações em cada amostra, conforme tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – valores de microdureza vickers em HV (*Harness vickers*)

AMOSTRAS	INDENTAÇÕES									
	HV1	HV2	HV3	HV4	HV5	HV6	HV7	HV8	HV9	HV10
XE	203	213	188	212	210	192	180	197	180	175
XD = YI	189	165	173	169	175	199	194	182	201	176
XC	206	205	211	188	195	181	179	180	171	187
YS	200	175	207	208	195	214	197	183	170	186
YC	173	172	183	168	172	173	182	169	182	175
ZI	201	196	191	199	197	171	184	171	169	155
ZS	195	175	197	175	186	177	188	179	212	179
ZC	179	173	188	178	176	158	167	165	167	168

As médias, variâncias e desvio padrão são apresentadas na tabela 3 a seguir:

Tabela 3 – Média, desvio padrão e variâncias das amostras

AMOSTRAS	MÉDIA	VAR	DPR
XE	195	201,5556	14,19703
XD = YI	182,3	162,9	12,76323
XC	190,3	180,2333	13,4251
YS	193,5	214,5	14,64582
YC	174,9	30,32222	5,506562
ZI	183,4	252,9333	15,90388
ZS	186,3	144,6778	12,02821
ZC	171,9	74,32222	8,621034

Foi realizado o teste anova a fim de verificar estatisticamente a grandeza de microdureza ao longo do eixo x, y e z. O objetivo desse teste é constatar se há variações nos valores das médias

- Teste anova no eixo Z

Anova: fator único

#### RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
ZI	10	1834	183,4	252,9333
ZC	10	1719	171,9	74,32222
ZS	10	1863	186,3	144,6778

#### ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1160,066667	2	580,0333	3,687173	0,038392	3,354131
Dentro dos grupos	4247,4	27	157,3111			
Total	5407,466667	29				

$F > F_{\text{critico}}$

H1 - existe diferença

$p < 0,05$

H0 - existe diferença

Conclusão do teste: amostras diferentes estatisticamente ao longo do eixo z

- EIXO Y

Anova: fator  
único

#### RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
YS	10	1935	193,5	214,5
YI	10	1950	195	201,5556
YC	10	1749	174,9	30,32222

## ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2507,4	2	1253,7	8,425823	0,001434	3,354131
Dentro dos grupos	4017,4	27	148,7926			
Total	6524,8	29				

$F > F_{\text{crítico}}$

H1 - existe diferença

$p < 0,05$

H0 - existe diferença

Conclusão do teste: amostras diferentes estatisticamente ao longo do eixo y

- EIXO X

Anova: fator

único

## RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
XE	10	1950	195	201,5556
XC	10	1903	190,3	180,2333
XD	10	1823	182,3	162,9

## ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	824,6	2	412,3	2,270838	0,122593	3,354131
Dentro dos grupos	4902,2	27	181,563			
Total	5726,8	29				

$F < F_{\text{critico}}$

$H_0$  - não existe diferença

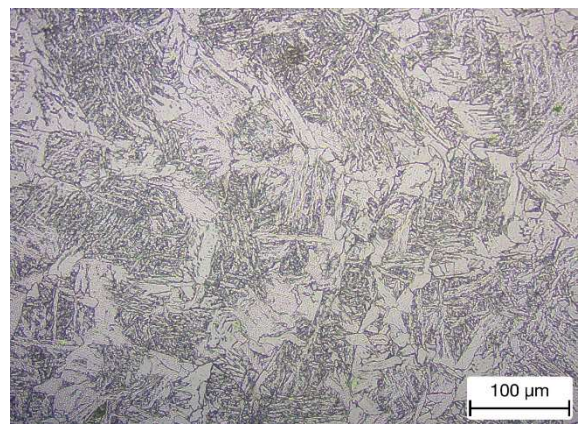
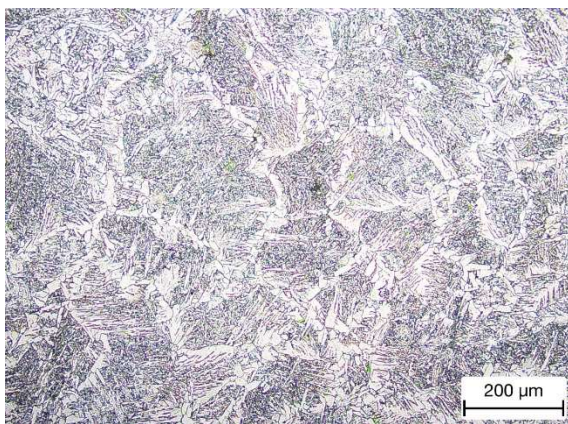
$p > 0,05$

$H_0$  - não existe diferença

Conclusão do teste: amostras estatisticamente iguais ao longo do eixo x

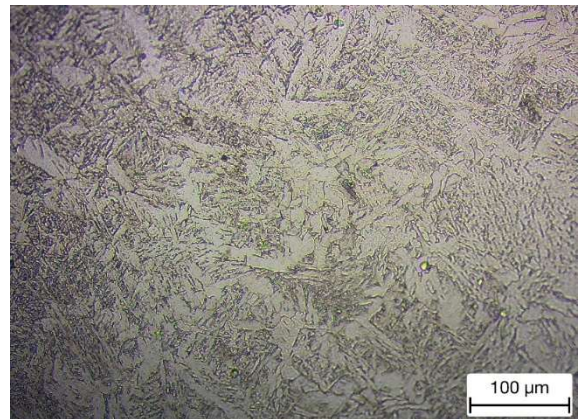
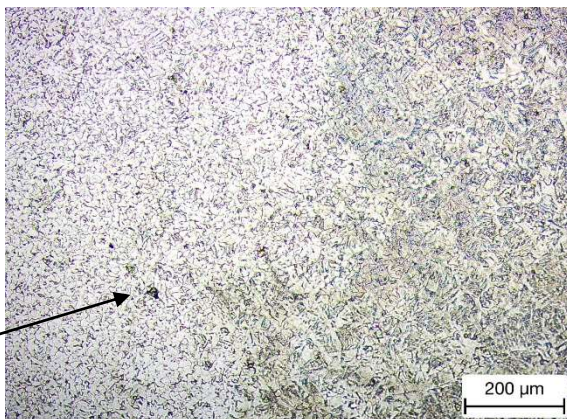
## 4.2 Microscopia Óptica

- AMOSTRA XC (100X//200X)



Contorno De Grão Separados Por Cementita E Ferrita

- AMOSTRA XD (100//200X)

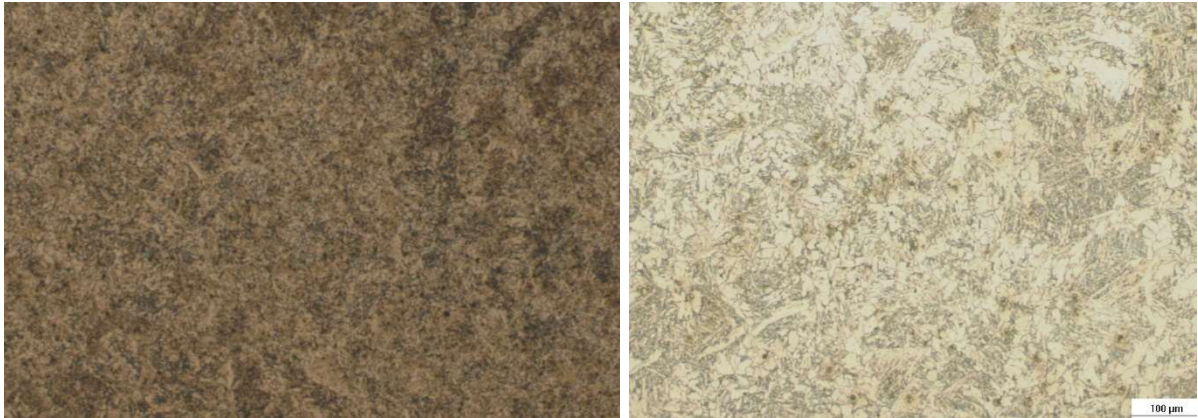


PERLITA

Contorno de grão separados por cementita e ferrita

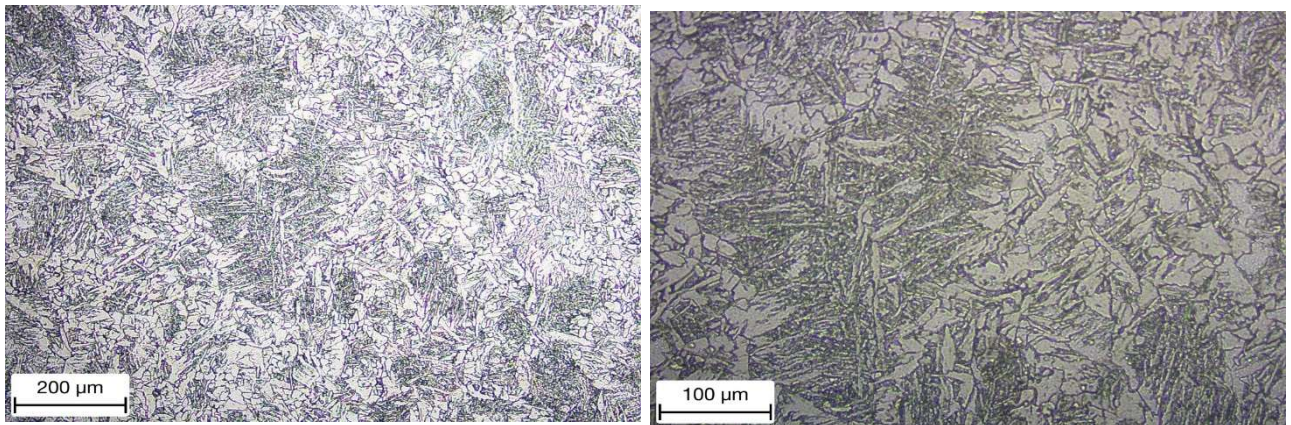
- AMOSTRA XE (100//200X)

= AMOSTRA YI



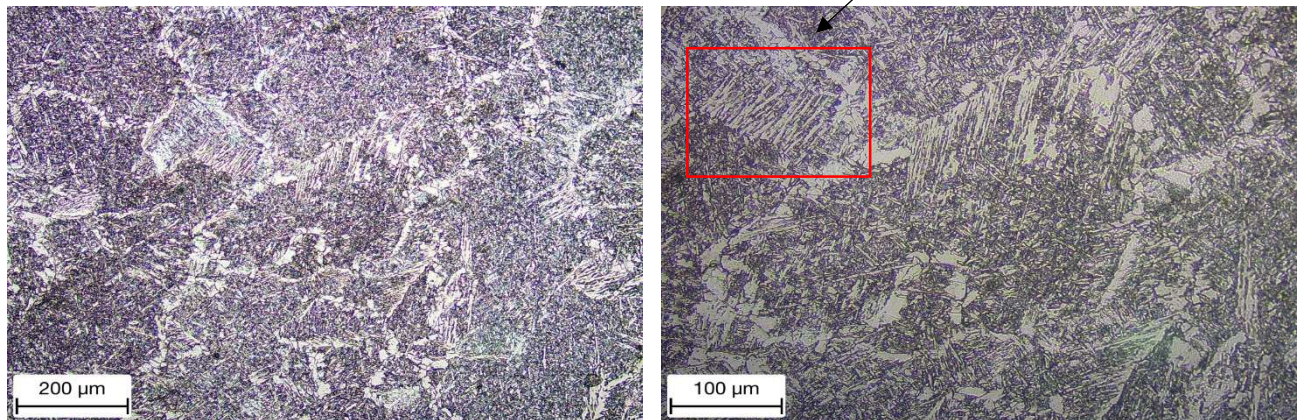
Contorno de grão separados por cementita e ferrita. Há grãos de ferrita contornando regiões de martensita

- AMOSTRA YC (100//200X)



É possível observar grãos de ferrita contornando fases de martensita (caracterizada por grãos colunares/alongados/em formato de agulhas). Na imagem à esquerda os grãos de ferrita são em sua maioria equiaxiais

- YS (100/200X)



É possível observar grãos de ferrita contornando fases de martensita (caracterizada por grãos colunares/alongados/em formato de agulhas)

## 5. Conclusão

- ▶ Na região central da peça (XC, ZC e YC) a microdureza apresentou valor mais baixo devido ao maior número de grãos recristalizados, ou seja, possui menos discordâncias;
- ▶ Quando medido nas bordas, a microdureza foi maior devido à presença de martensita e grãos mais resistentes.
- ▶ A microestrutura apresentou variação e diferença no tamanho de grãos devido aos ciclos térmicos presentes em peças impressas por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

## 6. Agradecimentos

Agradeço primeiro a Deus por me sustentar todos os dias. A minha esposa e aos meus orientadores, Dr Ferdinando e Dr Rafael, ao IFMA por me subsidiar com bolsa de estudo ao longo de 2 anos. Agradeço a coordenação do mestrado PPGCTM, principalmente ao professor Éden, que me auxilia diariamente.

## 7. Referências

COLPAERT, H. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns, 4ª. ed. São Paulo, Edgard Blucher, 2008

Ferreira, R.P.; Scotti, A. The Concept of a Novel Path Planning Strategy for Wire + Arc Additive Manufacturing of Bulky Parts: Pixel. Metals 2021, 11, 498. <https://doi.org/10.3390/met11030498>

FRONIUS. Cold Metal Transfer / A Tecnologia. Folheto, Edição PB, v.02, Março, 2017. Disponível em: <[www.fronius.com.br](http://www.fronius.com.br)>. Acesso em: 21 de jul de 2024.

GOMES, J. F. B.; BARBOSA, L. F. F. Avanços na Manufatura Aditiva em Metais: Técnicas, Materiais e Máquinas. Revista Tecnologia. Fortaleza, v. 41, n. 1, p. 1-16, jun. de 2020.

HACKENHAAR, W. Estudos das Propriedades Mecânicas e do Resfriamento em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco. Tese de Doutorado. p. 18-29. UFRGS. Porto Alegre, Dezembro, 2020.

KÖHLER, M.; FIEBIG, S.; HENSEL, J.; DILGER, K. Wire and Arc Additive Manufacturing of Aluminum Components. Metals, V. 9, no. 5: 608, Alemanha, 2019. <https://doi.org/10.3390/met9050608>

VOESTALPINE BÖHLER WELDING. BÖHLER SG 2 Solid Wire, Mild Steel. 2021. Disponível em: [http://www.vabwservice.com/documents/boehler/datenblaetter/en/L1\\_16699\\_en\\_\\_BOEHLER\\_SG\\_2\\_3U10B20\\_G\\_3291525\\_\\_EN.pdf?cache=1648417168](http://www.vabwservice.com/documents/boehler/datenblaetter/en/L1_16699_en__BOEHLER_SG_2_3U10B20_G_3291525__EN.pdf?cache=1648417168). Acesso em: 27 de mar. de 2024.