

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE-FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO METALÚRGICO DO AÇO 17-4 PH
IMPRESSO TRIDIMENSIONALMENTE POR MANUFATURA ADITIVA
INCORPORADO AO PROCESSO DE MOLDAGEM DE METAIS POR INJEÇÃO
NITRETADO EM ATMOSFERA GASOSA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MATHEUS RIBEIRO RODRIGUES E SILVA

RIO GRANDE, RS

2022

MATHEUS RIBEIRO RODRIGUES E SILVA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO METALÚRGICO DO AÇO 17-4 PH
IMPRESSO TRIDIMENSIONALMENTE POR MANUFATURA ADITIVA
INCORPORADO AO PROCESSO DE MOLDAGEM DE METAIS POR INJEÇÃO
NITRETADO EM ATMOSFERA GASOSA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande-FURG como requisito para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica” – Área de Concentração: Engenharia de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Braz Medeiros

Coorientador: Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl

RIO GRANDE, RS

2022

Ficha Catalográfica

S586e Silva, Matheus Ribeiro Rodrigues e.
Estudo do comportamento metalúrgico do aço 17-4 PH impresso tridimensionalmente por manufatura aditiva incorporado ao processo de moldagem de metais por injeção nitretado em atmosfera gasosa / Matheus Ribeiro Rodrigues e Silva. – 2022.
103 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2022.
Orientador: Dr. Jorge Luis Braz Medeiros.
Coorientador: Dr. Luciano Volcanoglo Biehl.

1. Aço 17-4 PH 2. Manufatura Aditiva (MA) 3. Moldagem de Metais por Injeção (MIM) 4. Nitretação Gasosa 5. Indústria 4.0. I. Medeiros, Jorge Luis Braz II. Biehl, Luciano Volcanoglo III. Título.

CDU 621

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jorge Luis Braz Medeiros
Universidade Federal do Rio Grande (FURG)

Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl
Universidade Federal do Rio Grande (FURG)

Prof. Dr. Alex Fabiano Bueno
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus pela dádiva da vida e por me possibilitar concluir com êxito esse trabalho.

Aos meus queridos pais José Rodrigues e Denilsa, por todo carinho, amor e por serem meus maiores exemplos.

A minha irmã Vanessa, por todo o afeto, suporte e votos de confiança.

A minha namorada Joseane, por todo incentivo, companhia e pelos diversos momentos compartilhados, repletos de amor e carinho.

A todos os meus colegas e amigos que fizeram parte dessa jornada. Em especial, aos meus grandes amigos Otávio Duarte, George Maximiano, Filipe Momberger, Rafael Bruno, Josiara Novôa e Daniel Borges, por sempre terem estado comigo, me apoiando, incentivando e pelos momentos marcantes.

Ao meu querido orientador professor Dr. Jorge Luiz Braz Medeiros, que fostes não somente orientador, mas também um grande amigo. Agradeço-te, professor, por toda a sua grande contribuição acadêmica, pelo carinho, pelas inúmeras ligações e mensagens. Além da grande orientação e apoio para o presente trabalho, o senhor foi além, tendo se tornado o meu exemplo de profissional e de ser humano, tendo sempre me ajudado e preocupado com o meu bem estar. Obrigado por ter confiado em mim, às vezes, até mais do que eu.

Ao meu co-orientador Luciano Volcanoglo Biehl, por todos os ensinamentos, pela contribuição acadêmica, pelas sábias palavras e votos de confiança.

Ao técnico Jorge Oliveira por todos os ensinamentos e presteza nas diversas atividades experimentais realizadas no laboratório.

Ao colega de Mestrado Maicon Leivas por todo o grande conhecimento compartilhado, tendo em algumas ocasiões, realizado ponderações que contribuíram de maneira significativa para esse trabalho.

A todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para esse trabalho, o meu muito obrigado!

RESUMO

Com a busca pelo aumento da eficiência e melhoria dos processos contidos nos modelos de produção, surgem inovações tecnológicas no campo da automação, nascendo assim, a Indústria 4.0. Um dos pilares dessa Quarta Revolução Industrial é a Manufatura Aditiva (MA) que permite projetar e produzir, de forma rápida, peças com geometrias complexas, atendendo assim a demanda de vários segmentos da indústria. Dessa forma, o presente trabalho estuda o comportamento metalúrgico do aço 17-4 PH impresso tridimensionalmente por Manufatura Aditiva (MA), incorporado ao processo de Moldagem de Metais por Injeção (MIM) e posteriormente submetido ao tratamento termoquímico de nitretação gasosa por 96 horas. Para o estudo foram utilizados dois materiais, sendo o Material A fabricado por MA e MIM e o Material B fabricado somente por MIM. A caracterização para ambos os materiais foi realizada através da análise química, do ensaio de microdureza Vickers, da análise micrográfica por Microscópio Óptico (MO) e por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), da avaliação da porosidade e do ensaio de Difração de Raios X (DRX). Após a nitretação gasosa, o Material A obteve uma dureza superficial média de 895,5 HV_{0,3}, 365 % acima da dureza obtida no metal de base para esse material, já para o Material B, esses resultados foram de 854,6 HV_{0,3} e 285 %, respectivamente. Os resultados obtidos se mostraram satisfatórios uma vez que evidencia a possibilidade da fabricação de peças com um alto grau de complexidade geométrica, com uma alta dureza superficial, na velocidade e qualidade que a Indústria 4.0 necessita.

Palavras-chave: Aço 17-4 PH, Manufatura Aditiva (MA), Moldagem de Metais por Injeção (MIM), Nitretação Gasosa, Indústria 4.0.

ABSTRACT

With the search for increased efficiency and improvement of the processes contained in the production models, technological innovations in the field of automation emerge, thus giving rise to Industry 4.0. One of the pillars of this Fourth Industrial Revolution is Additive Manufacturing (AM), which allows the rapid design and production of parts with complex geometries, thus meeting the demand of various segments of the industry. Thus, the present work studies the metallurgical behavior of 17-4 PH steel three-dimensionally printed by Additive Manufacturing (AM), incorporated into the Metal Injection Molding (MIM) process and subsequently subjected to the thermochemical treatment of gas nitriding for 96 hours. For the study, two materials were used, Material A manufactured by MA and MIM and Material B manufactured only by MIM. The characterization for both materials was carried out through chemical analysis, Vickers microhardness test, micrographic analysis by Optical Microscope (OM) and Scanning Electron Microscopy (SEM), porosity evaluation and X-Ray Diffraction (XRD) test. After gas nitriding, Material A obtained an average surface hardness of 895,5 HV_{0,3}, 365 % higher the hardness obtained in the base metal for this material, as for Material B, these results were 854,6 HV_{0,3} and 285 %, respectively. The results obtained were satisfactory since it shows the possibility of manufacturing parts with a high degree of geometric complexity, with a high surface hardness, at the speed and quality that Industry 4.0 requires.

Keywords: 17-4 PH Steel, Additive Manufacturing (AM), Metal Injection Molding (MIM), Gaseous Nitriding, Industry 4.0.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Inovações tecnológicas da Indústria 4.0.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2 – Distribuição dos processos de fabricação mecânica – processo a ser aplicado de acordo com a complexidade da peça e a quantidade a ser produzida.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3 – Etapas do Processo MIM.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 4 – Propriedades mecânicas das peças entre as etapas do processo MIM.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 5 -Tolerância Dimensional versus Tamanho do Componente MIM.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 6 - Etapas de um processo de impressão 3D.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 7 - Processo generalizado da Manufatura Aditiva.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 8 – MA aplicada no setor automobilístico.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 9 – Representação esquemática da tecnologia Binder Jetting na produção de peças verdes para o processo MIM.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 10 – Representação esquemática da morfologia e das etapas da tecnologia FDM/FFF incorporada ao processo MIM.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 11 – Classificações dos aços inoxidáveis austeníticos de acordo com a sua composição.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 12 – DRX dos pós metálicos do aço inoxidável 17-4 PH produzidos por sob diferentes atmosferas de atomização.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 13 – Etapas do processo de nitretação a plasma.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 14 – Química do processo de nitretação gasosa.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 15 – Fluxograma da metodologia adotada para a elaboração do trabalho.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 16 – Micrografia do metal base do Material A, obtida por MO.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 17 – Micrografia do Material A nitretado, obtida por microscópio.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 18 – Micrografia do Material A nitretado, obtida por MEV.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 19 – Micrografia do metal base do Material B, obtida por microscópio.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 20 – Micrografia do Material B nitretado, obtida por microscópio.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 21 – Micrografia do Material B nitretado, obtida por MEV.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 22 – Microdureza Vickers Superficial dos materiais A e B.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 23 – Microdureza Vickers Superficial dos materiais A e B.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 24 – Perfil de Microdureza Vickers para os materiais A e B.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 25 – Análise de porosidade do Material A.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 26 – Análise de porosidade do Material B.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 27 – DRX do Aço 17-4 PH.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 28 – Análise DRX para o Material A Nitretado.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 29 – Análise DRX para o Material B Nitretado.....</i>	<i>84</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Aplicabilidade do processo MIM.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 2 – As sete categorias da MA e suas descrições de acordo com a EN ISO / ASTM 52921: 2017 [6].....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 3 – Composição química de alguns tipos de aços inoxidáveis endurecidos por precipitação.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 4 – Tratamentos térmicos usuais para os aços inoxidáveis endurecidos por precipitação.</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 5 – Composição química dos dois materiais 17-4 PH utilizados, A e B.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 6 – Ensaio de Microdureza Vickers para os materiais A e B, na camada nitretada e no material base.</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 7 – Porosidade dos materiais A e B.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 8 - Resultados do Difratoograma do Material A NITRETADO</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 9 - Resultados do Difratoograma do Material B NITRETADO</i>	<i>85</i>

LISTA DE ABREVIATURAS

3D	Tri-Dimensional
3DP	3D Printing – (Impressão 3D)
3MF	3D Manufacturing Format (Extensão de Arquivo 3D)
3SP	Scan, Spin, and Selectively Photocure (Varredura, Rotação e Fotocura Seletiva)
AM	Additive Manufacturing (Manufatura Aditiva)
AMF	Additive Manufacturing File Format – (Formato de Arquivo para Manufatura Aditiva)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana de Testagem e Materiais)
AWS	American Welding Society – (Sociedade Americana de Soldagem)
BASF	Badische Anilin & Soda Fabrik – (Fábrica de anilina e refrigerante de Baden)
BJ	BinderJetting - Jateamento de Aglutinantes
CAD	Computer Aided Design - Desenho Assistido por Computador
CEQ	Carbono Equivalente
CLIP	Continuous Liquid Interface Production - Produção Contínua da Interface Líquida
DIW	Robocasting or Direct Ink Writing (Escrita Direta com Tinta)
DLP	Digital Light Processing (Processamento Digital de Luz)
DMD	Direct Metal Deposition - Deposição Direta de Metal
DMLS	Direct Metal Laser Sintering - Sinterização de Metal Direta por Laser
DRX	Difração de Raios X
EADS	European Aeronautic Defence and Space -Companhia Europeia de Defesa Aeronáutica e Espacial

EASA	European Union Aviation Safety Agency - Agência Europeia para a Segurança da Aviação
EBM	Electron Beam Melting - Fusão por Feixe de Elétrons
FDM	Fused Deposition Modeling (Modelagem por Deposição Fundida)
FEA	Finite Element Analysis - Análise de Elementos Finitos
FFF	Fused Filament Fabrication (Fabricação com Filamento Fundido)
HP	HP Jet Fusion - Tecnologia de Fusão a Jato da HP
HSS	High Speed Sintering - Alta Velocidade de Sinterização
HTSN	High Temperature Solution Nitriding - Nitretação a Altas Temperaturas
HV	Hardness Vickers - Dureza Vickers
ISO	International Organization for Standardization – (Organização Internacional de Normalização)
LAM	Laser Additive Manufacturing - Manufatura Aditiva a Laser
LENS	Laser Engineered Shaping - Adição Volumétrica a Laser
LMD	Laser Metal Deposition - Deposição de Metais a Laser
LOM	Laminated Object Manufacture - Manufatura de Objetos em Lâminas
LTN	Low Temperature Nitriding - Nitretação a Baixas Temperaturas
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MIM	Metal Injection Moulding (Moldagem de Metais por Injeção)
MO	Microscópio Óptico
MJF	Multi-Jet Fusion - Fusão Multi-Jato
MJM	Multi-Jet Modeling - Modelagem Multi-Jato
MRI	Magnetic Resonance Imaging - Imagem por Ressonância Magnética
OBJ	Object File Wavefront 3D - (Extensão de Arquivo 3D)
PH	Precipitation Hardenable – (Endurecidos por Precipitação)
PIM	Powder Injection Moulding - (Moldagem de Pós por Injeção)

PLY	Polygon File Format - (Extensão de Arquivo 3D)
SCP	Smooth Curvatures Printing - Impressão de Curvas Suaves
SDL	Selective Deposition Lamination - Deposição Seletiva de Lâminas
SDS	Shaping, Debinding and Sintering - Modelagem, Extração de Aglutinantes e Sinterização
SLA	Stereolithographic Apparatus (Estereolitografia)
SLM	Selective Laser Melting - Fusão Seletiva a Laser
SLS	Selective Laser Sintering (Sinterização Seletiva a Laser)
STL	Standard Tessellation Language - Linguagem de Mosaico Padrão
SULSA	Southampton University Laser Sintered Aircraft - Aeronave Sinterizada a Laser da Universidade de Southampton
TC	Tomografia Computadorizada
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing - Manufatura Aditiva Ultrassônica

LISTA DE SÍMBOLOS

TM	<i>Trademark</i> – (Marca Registrada)
μ	Micro (10^{-6}).
HV _{XX}	HV - Microdureza Vickers; sub índice XX – Carga da indentação durante o ensaio em Kg. (HV _{0,3} – Microdureza Vickers para um ensaio com uma carga de 0,3Kg, ou ainda, 300 g).
α	<i>do grego, letra “alpha”</i> – Ferro alfa.
ε	<i>do grego, letra “épsilon”</i> – Nitreto de Ferro do tipo Fe_23N .
γ'	<i>do grego, letra “gama” acrescida das aspas (gama linha)</i> – Nitreto de Ferro do tipo $Fe4N$.
Cu_3N	Nitreto de Cobre.
–	Ligação orgânica simples.
=	Ligação orgânica composta.

LISTA DE EQUAÇÕES

<i>Equação 1 - Decomposição Catalítica da Amônia em Nitrogênio</i>	<i>54</i>
<i>Equação 2 – Potencial de Nitretação da Atmosfera do Forno</i>	<i>54</i>
<i>Equação 3 – Carbono Equivalente Para Aços Convencionais</i>	<i>58</i>
<i>Equação 4 – Carbono Equivalente Para Aços Alta Liga</i>	<i>58</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	JUSTIFICATIVA.....	19
3	OBJETIVOS.....	20
3.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
4.1	INDÚSTRIA 4.0	22
4.2	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO MECÂNICA E MANUFATURA DE AÇOS 22	
4.3	PROCESSOS MPI (MOLDAGEM DE PÓS POR INJEÇÃO) E MIM (MOLDAGEM DE METAIS POR INJEÇÃO).....	24
4.3.1	CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO MIM	25
4.3.2	APLICAÇÕES UTILIZANDO O PROCESSO MIM.....	27
4.4	MANUFATURA ADITIVA	28
4.4.1	HISTÓRIA DA MANUFATURA ADITIVA (MA)	29
4.4.2	CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA .	31
4.4.3	ETAPAS DO PROCESSO GENERALIZADO DA MANUFATURA ADITIVA 34	
4.4.4	APLICAÇÕES DA MANUFATURA ADITIVA	35
4.5	USO DE TECNOLOGIAS DE MA INCORPORADAS AO PROCESSO DE PRODUÇÃO MIM.....	38
4.5.1	TECNOLOGIA JATEAMENTO DE AGLUTINANTE (BINDER JETTING) 38	
4.5.2	TECNOLOGIA FDM/FFF	40
4.6	AÇOS INOXIDÁVEIS E SUAS APLICAÇÕES	41
4.6.1	AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS	41
4.6.2	AÇOS INOXIDÁVEIS ENDURECIDOS POR PRECIPITAÇÃO	44
4.7	TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS	49
4.7.1	NITRETAÇÃO.....	49
5	MATERIAIS E MÉTODOS	56
5.1	OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS.....	56

5.1.1	MATERIAL A - AÇO 17-4 PH OBTIDO POR TECNOLOGIAS MA E MIM	57
5.1.2	MATERIAL B - AÇO 17-4 PH OBTIDO POR TECNOLOGIA MIM.....	57
5.2	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	57
5.2.1	ANÁLISE QUÍMICA	58
5.2.2	ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	58
5.2.3	AVALIAÇÃO DA MICRODUREZA VICKERS	60
5.2.4	AVALIAÇÃO DA POROSIDADE.....	60
5.2.5	ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X	61
5.3	NITRETAÇÃO GASOSA	61
5.4	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS NITRETADAS	62
6	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	63
6.1	ANÁLISE QUÍMICA.....	63
6.2	ANÁLISE MICROESTRUTURAL	63
6.3	MICRODUREZA VICKERS	75
6.4	AVALIAÇÃO DA POROSIDADE	79
6.5	ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	82
7	CONCLUSÕES	86
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
9	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
10	REFERÊNCIAS.....	89
10.1	REFERÊNCIAS NOMINAIS	89
10.2	REFERÊNCIAS POR ESTRATO	100
10.3	REFERÊNCIAS POR QUALIS	101
10.4	REFERÊNCIAS POR DATA DOS ARTIGOS.....	102
	ANEXO A – OUTROS TERMOS UTILIZADOS QUE SE REFEREM A ADDITIVE MANUFACTURING (AM).....	103

1 INTRODUÇÃO

Com a busca pelo aumento da eficiência e melhoria dos processos contidos nos modelos de produção, surgem inovações tecnológicas no campo da automação, nascendo assim, a Indústria 4.0.

Uma dessas inovações é a Manufatura Aditiva (MA), processo de fabricação esse totalmente indicado para as novas requisições do atual mercado (protótipos com geometrias complexas em uma quantidade inferior àquela da produção em massa).

Ainda, comparada com os outros processos de fabricação convencionais como a fundição, o forjamento e a usinagem, a MA é caracterizada por ser um processo mais sustentável, visto que há economia de energia (aliada a redução da velocidade de produção) e a economia de material.

A MA é capaz de fabricar peças poliméricas, cerâmicas e metálicas, podendo assim, atender vários segmentos de mercado. Como exemplo podemos citar a produção de diversas peças e componentes para os setores aeronáutico e automobilístico. Ainda, para a área da medicina, é possível a confecção de equipamentos de proteção pessoal, de dispositivos médicos e até mesmo de enfermarias de isolamento.

Contudo, muitos materiais já produzidos pelos diversos tipos de fabricação convencionais atuais não se encontram no estado desejável para atender determinadas aplicações de engenharia, devendo ter suas propriedades mecânicas aprimoradas. Para solucionar esse problema há os tratamentos térmicos, a engenharia de superfície com as deposições de camadas e filmes nos materiais e por fim, os tratamentos termoquímicos.

Os tratamentos termoquímicos endurecem apenas a superfície dos aços, preservando a tenacidade do núcleo do material. Tal beneficiamento mecânico do material é ideal para operações de trabalho em que componentes com elevada dureza e que também possuam uma boa capacidade de absorção de impactos são requeridos.

A nitretação dos aços trata-se de um processo termoquímico no qual o material possui sua superfície endurecida através da distorção do reticulado

cristalino, causada pela difusão de átomos de nitrogênio e também pela precipitação de nitretos (compostos entre nitrogênio e átomos de ferro e ou elementos de liga).

Logo, com a finalidade de agrupar vantagens dos vários processos acima citados, o presente trabalho busca comparar o desempenho metalúrgico do aço inoxidável martensítico 17-4 PH impresso tridimensionalmente pelo processo de MA, incorporado ao processo de Moldagem de Metais por Injeção (MIM) e posteriormente submetido ao processo de nitretação gasosa com outro aço 17-4 PH, que também sofreu o mesmo tratamento termoquímico, porém produzido integralmente pela tecnologia MIM. Portanto, para o estudo, foram utilizados dois materiais do aço 17-4 PH: o Material A fabricado por MA e MIM e o Material B fabricado somente por MIM.

2 JUSTIFICATIVA

A Indústria 4.0, com a adesão de sistemas inteligentes, internet das coisas, big data, Manufatura Aditiva dentre outros, tem reinventado o atual panorama de produção. Nessa perspectiva, a MA representa uma evolução dentro dos processos de fabricação. O seu avanço na área metálica tem sido estudado e pesquisado de forma criteriosa nos últimos anos.

Este trabalho se justifica pelo desenvolvimento da manufatura aditiva metálica (impressão 3D) de aços inoxidáveis de classe endurecido por precipitação associado ao tratamento termoquímico de nitretação gasosa para longos tempos de processamento.

Dessa forma, podem ser visualizados os efeitos da difusão do nitrogênio em materiais que apresentam sabidamente um volume de porosidade diferenciado em relação aos processos convencionais de fabricação.

A partir disso, será possível conhecer as características do substrato e da Engenharia de Superfície dos aços 17-4 PH impressos tridimensionalmente nitretados bem como comparar o desempenho metalúrgico dessa nova tecnologia que é a MA com o processo convencional de fabricação MIM.

3 OBJETIVOS

A principal proposta desse trabalho é comparar o desempenho metalúrgico do aço 17-4 PH impresso tridimensionalmente pelo processo de Manufatura Aditiva (MA), incorporado ao processo de Moldagem de Metais por Injeção (MIM) e posteriormente submetido ao processo de nitretação gasosa, com outro aço 17-PH produzido integralmente pelo processo MIM e que também foi submetido ao mesmo tratamento termoquímico de nitretação gasosa.

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Quantificar a proporção de elementos químicos presentes nos materiais através do ensaio de espectrometria;
- Analisar através do MO e do MEV a microestrutura martensítica do material base e a camada branca dos materiais nitretados;
- Traçar um perfil de microdureza *Vickers* para os materiais.
- Obter as microdurezas *Vickers* do metal de base e da superfície para os materiais nitretados e quantificar o endurecimento superficial devido ao processo termoquímico de nitretação;
- Quantificar o volume de porosidade presente nas amostras;
- Analisar e comparar os difratogramas dos materiais obtidos pelo ensaio de DRX.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo, organizado em sete seções, traz conceitos que nortearam a fundamentação teórica e prática deste trabalho.

A seção 4.1 **Indústria 4.0** busca trazer as principais inovações tecnológicas presentes na Quarta Revolução Industrial, na qual a MA é uma delas.

A seção 4.2 **Processos de Fabricação Mecânica e Manufatura de Aços** apresenta uma discussão de como os processos de fabricação sofrem constantes mudanças. É apresentada uma distribuição dessas tecnologias de fabricação, evidenciando a nova tendência dos processos MA e MIM sob os outros mais convencionais. Esses que serão abordados na sequência.

A seção 4.3 **Processos MPI e MIM** explana as etapas, as propriedades mecânicas, as características, e a aplicabilidade desses dois processos de fabricação de componentes mecânicos por moldagem.

Já a seção 4.4 **Manufatura Aditiva** traz, em ordem cronológica, a história desse inovador e revolucionário processo de fabricação mecânica. É exibida uma tabela, segundo a norma EN ISO / ASTM 52921: 2017, a qual retrata as sete categorias e as tecnologias disponíveis dentro de cada uma das classes MA. Também é mostrado alguns exemplos do emprego da MA.

A seção 4.5 **Uso de Tecnologias MA Incorporadas ao Processo de Produção MIM** debate sobre as tecnologias MA, Jateamento de Aglutinante (*Binder Jetting*) e Fabricação com Filamento Fundido (FFF), que podem ser incorporadas ao MIM para a criação das peças verdes.

A seção 4.6 **Aços Inoxidáveis e Suas Aplicações**, irá aludir sobre as características e propriedades dos aços inoxidáveis austeníticos e endurecíveis por precipitação, dando ênfase aos tipos 316L e 17-4PH, esses que são um dos principais tipos de aços que integram a tecnologia FFF para a impressão de peças verdes por meio da MA que serão incorporados as etapas de remoção de aglutinante (*debinding*) e sinterização do processo MIM.

Por fim, a seção 4.7 **Tratamentos Termoquímicos** estende-se sobre a importância desse processo para a melhoria das propriedades superficiais do aço e faz uma abordagem sobre os tipos de nitretação líquida, a plasma e gasosa, dando um enfoque maior para essa última metodologia, visto que será a empregada nesse trabalho.

4.1 INDÚSTRIA 4.0

O modelo de Indústria 4.0 consiste na adoção e integração de toda a cadeia de valor do ciclo de vida dos produtos [1]. A Figura 1 ilustra as principais inovações tecnológicas que têm agregado valor aos produtos oriundos dessa nova Revolução Industrial [1, 2]. Dentre essas inovações, um destaque especial vai para a Manufatura Aditiva (MA), processo de fabricação esse que foi utilizado no presente trabalho.

Figura 1 – Inovações tecnológicas da Indústria 4.0.



Fonte: Altus (2019) [2].

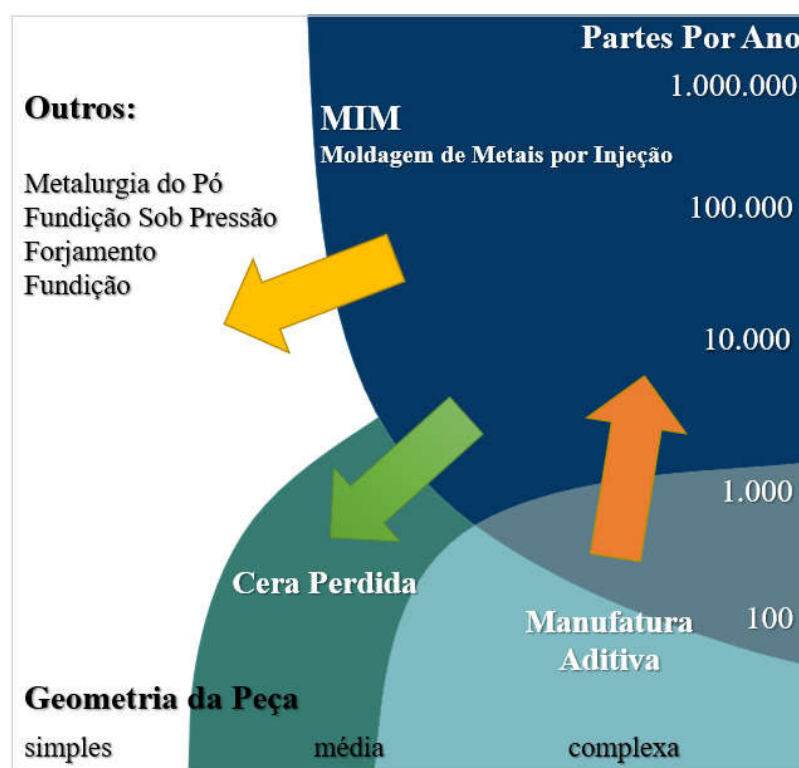
4.2 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO MECÂNICA E MANUFATURA DE AÇOS

A Manufatura Aditiva (MA), elemento da Indústria 4.0, significa um caminho disruptivo de como serão fabricados as novas peças e produtos [3]. A sustentabilidade dos processos de fabricação mecânica é uma questão de suma importância para enfrentar os problemas ambientais, principalmente aos que tange ao aquecimento global e limitação de recursos naturais [4-5]. As quantificações de índices como o potencial de economia de energia, a economia de material, a

extensão da vida útil, a reciclagem, consolidação de peças e a otimização de processos, dentre outros, são bons indicadores para avaliar o desenvolvimento sustentável das operações necessárias à fabricação mecânica [6-7]. As características ímpares e os recursos da MA podem fornecer uma solução para tornar os processos de fabricação mais sustentáveis [1,3,5,8-9].

Com base nessa perspectiva, é esperado que os processos de fabricação mecânica dos aços evoluam de forma a tornarem a produção desse setor cada vez mais competitiva e sustentável. Nesse aspecto, conforme evidenciado pela Figura 2, os processos MA juntamente com o MIM por se tratarem de tecnologias capazes de produzirem componentes com formatos complexos associados ao não desperdício de matéria-prima (principalmente se comparado com as técnicas subtrativas), apresentam grandes tendências de crescimento e uso sobre os outros processos.

Figura 2 – Distribuição dos processos de fabricação mecânica – processo a ser aplicado de acordo com a complexidade da peça e a quantidade a ser produzida.



Fonte: Adaptado de Petzoldt (2018) [10].

A Figura 2 mostra a distribuição dos processos de fabricação mecânica. Nota-se que: a combinação de peças com geometrias simples e produções pequenas, ainda operam com etapas simples de fabricação como metalurgia do pó, fundição sob pressão, forjamento, fundição, dentre outros; a fabricação com cera perdida é indicada para geometrias com médio grau de complexidade e pequenas produções; o processo MA que era indicado para peças com geometrias complexas e baixos volumes de produção, vem ganhando espaço e até mesmo sendo integrado ao processo MIM, esse que se torna viável para grandes complexidades de geometria e grandes lotes de produção.

4.3 PROCESSOS MPI (MOLDAGEM DE PÓS POR INJEÇÃO) E MIM (MOLDAGEM DE METAIS POR INJEÇÃO)

A Moldagem de Pós por Injeção (MPI) consiste na fabricação de peças por moldagem em uma máquina injetora, após estas percorrerem os processos de extração de ligantes, e de sinterização em forno, respectivamente. A matéria-prima utilizada na PIM pode ser metálica, cerâmica ou ainda um compósito [11].

A Moldagem de Metais por Injeção (MIM) é um processo derivado da MPI, com a única diferença que a matéria predominante da carga injetável se trata de materiais metálicos. Esse processo, mostrado na Figura 3, tem seu início com a mistura do pó metálico com um aglutinante (*binder*), resultando-se na matéria prima granulada a ser injetável (*pellets* ou *feedstock*). Na sequência, a carga injetável é inserida no molde, ganhando o formato da peça. Após vem a etapa de desmolde, e então a peça “verde” sofrerá em seguida um processo para a extração do aglutinante (*debinding*). Por fim, a peça “marrom” será submetida ao processo de sinterização com o principal objetivo de ganhar resistência mecânica [9]. A Figura 4 mostra a quantidade de aglutinante remanescente em cada uma dessas etapas.

Figura 3 – Etapas do Processo MIM



Fonte: Adaptado de Hauck (2017, p. 3) [12].

Figura 4 – Propriedades mecânicas das peças entre as etapas do processo MIM.



Fonte: Adaptado de Xiangji Kong (2011, p. 19) [13].

4.3.1 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO MIM

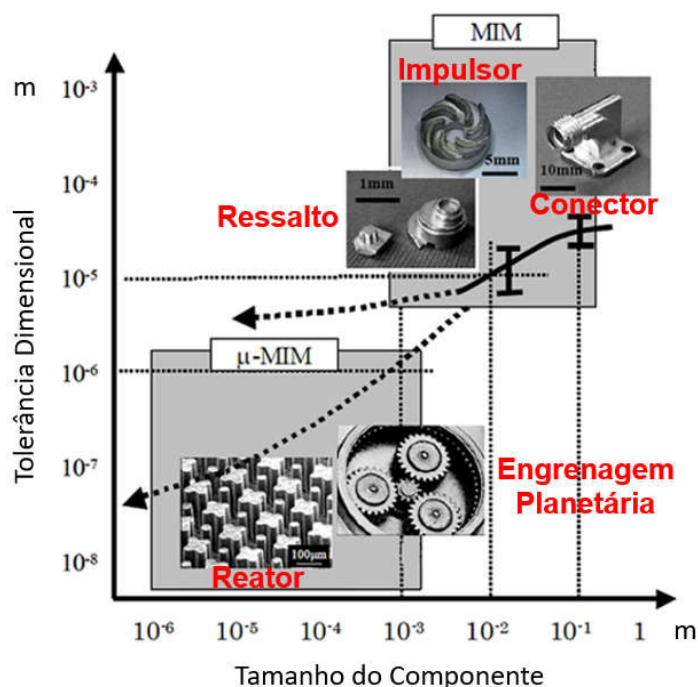
A tecnologia MIM apresenta um alto acabamento superficial, com tolerâncias dimensionais de aproximadamente 3% [14] e as peças finais deste

processo possuem, aproximadamente, uma densidade picnométrica final de 97%. [15].

O processo MIM é vantajoso por permitir a manufatura econômica de baixos e altos volumes de peças com formatos complexos, tendo ainda uma grande variedade de metais e compostos intermetálicos como matéria-prima para a confecção dos produtos finais [16]. Dentre outras vantagens desta técnica temos: um baixo tempo de produção em comparação com os processos de fundição e usinagem; a redução do desperdício de material devido a matéria-prima ser um líquido injetável; e poucas operações de acabamento são necessárias até chegar no produto final [17].

À medida que o tamanho dos produtos a serem fabricados são reduzidos, a precisão dimensional aumenta, pois essa fica dentro de alguns décimos de micrômetros [18]. Para solucionar esse problema, a tecnologia μ -MIM utiliza pós metálicos mais finos, da ordem de micrometros, melhorando a precisão dimensional e a rugosidade dos produtos (ver Figura 5). Também é esperado o crescimento do grão reduzindo a temperatura de sinterização [19].

Figura 5 -Tolerância Dimensional versus Tamanho do Componente MIM.



Fonte: Adaptado de Nishiyabu (2012, p.107) [20].

Uma peça construída pelo método MIM requer um projeto com base na sua forma, tamanho e geometria para obterem uma performance desejada. No entanto, o processo possui algumas limitações. Deve-se evitar projetos contendo cantos agudos, transições de espessuras grossas para finas, ângulos de inclinação e raios de canto. Já as restrições acerca da espessura da peça são limitadas pela matéria-prima a ser utilizada. A maioria das peças, normalmente, possuem uma espessura de seção transversal máxima inferior a 7mm. Insumos a base de acetal ou de polissacarídeo-água, são exemplos de matérias-primas que permitem a fabricação de componentes contendo seções transversais mais espessas [21].

4.3.2 APLICAÇÕES UTILIZANDO O PROCESSO MIM

Mathew e Mastromatteo (2003) [22], utilizaram uma carga injetável com base em um aglutinante feito de ágar à base de água juntamente com o pó do aço inoxidável 17 – 4PH. O aglutinante utilizado permite produzir peças grandes e grossas na faixa de um a dois quilos, enquanto que as propriedades de tração média do aço 17 – 4PH são equivalentes à dos componentes forjados e superiores a das peças fundidas. Assim, essa combinação garante a confecção, através da tecnologia MIM, de componentes de alto desempenho para a indústria automobilística.

Ferreira, Vieira e Costa (2016) [23], empregando o MIM e tendo o aço 316L como pó metálico desse processo, produziram implantes dentários revestidos com fina película de sulfuretos dichalcogenetos (W-S-C) que confeccionou uma alta dureza e quase reduziu o atrito. Essa produção resultou em implantes mais baratos, na qual a modificação da superfície garante uma bioatividade semelhante ou superior aos implantes comerciais.

Ott e Peretti (2012) [24], investigaram o processo MIM para a sua aplicação em superligas para fabricar componentes aeroespaciais pequenos e de formato complexo. Realizando um controle suficiente sobre as etapas de processamento, de riscos de inclusões e análise química, concluíram que essa tecnologia pode ser aplicada com sucesso para produzir componentes aeronáuticos utilizando a liga de aço 718.

Várias são as áreas e as demandas pelo uso da tecnologia MIM. A Tabela 1 exemplifica as aplicações potenciais desse processo.

Tabela 1 - Aplicabilidade do processo MIM

Áreas	Aplicações Potenciais
Automotiva	Sistemas de sincronização do motor, injeção de combustível, componente do trilho de combustível, pequenas engrenagens de precisão, dispositivos de segurança de passageiros, bombas, sensores de pressão, componentes do sistema ABS, componentes decorativos internos e externos, conectores de serviço severo, sistemas de ignição, componentes de válvula variável.
Dental	Ferramentas, equipamentos e braquetes ortodônticos.
Esportiva	Arco e flecha, ciclismo, armas de fogo, molinetes de pesca, facas, ferramentas recreativas, equipamentos de mergulho.
Indústria	Sensores de pressão, componentes de compressores, ferramentas elétricas, ferramentas manuais, pequenas engrenagens de precisão, conectores de serviços severos, conjuntos mecânicos, gatilhos, válvulas, bombas.
Médica	Ampla gama de aplicações de dispositivos para componentes de atuação, fixação, corte, perfuração, vedação, grampeamento, sutura. Estudos de biocompatibilidade estão em andamento para determinar a adequação do LM105 para implantes.

Fonte: Adaptado de Hauck (2017, p.18) [12].

4.4 MANUFATURA ADITIVA

Segundo a norma ASTM F2792-12 (2012) [25], fabricação aditiva pode ser definida como “processo de unir materiais para fazer objetos a partir de dados de um modelo 3D, geralmente camada após camada, ao contrário de metodologias de fabricação subtrativas, como a usinagem”.

A Manufatura Aditiva (Additive Manufacturing - AM) é uma tecnologia para fabricar objetos reais tridimensionais (3D), usando metais, cerâmicos ou plásticos, os quais podem ser usados em várias aplicações [26]. O processo da manufatura aditiva, conforme ilustrado pela Figura 6, tem início com o modelamento de um modelo geométrico em 3D, o qual é decomposto, eletronicamente por meio de um plano cartesiano 2D em várias fatias, essas serão impressas e então empilhadas e aderidas uma as outras, consolidando assim então, o produto final.

Figura 6 - Etapas de um processo de impressão 3D.

			
Modelo geométrico 3D (por exemplo, CAD)	Planejamento de processo (fatiamiento)	Processamento por adição das camadas	Peça fabricada
Modelo eletrônico 3D		Modelo físico	

Fonte: Volpato (2017, p. 17) [27]

Conforme mostrado no ANEXO A [28], vários são os termos utilizados para se referirem a Manufatura Aditiva. Embora sejam comumente considerados sinônimos, há por parte de alguns autores uma distinção entre a MA e a Impressão 3D. Para Aranha (2019) [29], o termo Impressão 3D se trata de um processo com ajustes de parâmetros dependente da casualidade e da habilidade do operador, ao passo que MA é o processo de construção de peças por Impressão 3D, no qual é assegurada a garantia da qualidade do produto final, por meio de processos automáticos, da supervisão e controle dos limites de tolerância previamente estabelecidos. Assim podemos dizer que a MA engloba o processo de Impressão 3D.

4.4.1 HISTÓRIA DA MANUFATURA ADITIVA (MA)

A história da MA tem seu início na década de 1980 no Japão, onde Hideo Kodama registra o primeiro pedido de patente de impressão 3D, descrevendo um sistema de prototipagem rápida de polímero que usa luz ultravioleta para endurecer o material [30-33].

Em 1983, Charles Hull inventou a primeira máquina de Estereolitografia (SLA), conseguindo no ano de 1986, a primeira patente para a impressão 3D em uma máquina SLA. Hull continua a cofundar a empresa 3D Systems Corporation. No ano de 1988, a 3D Systems comercializa o SLA-1, essa que foi a primeira impressora para Prototipagem Rápida [32,34].

No ano de 1988 Carl Deckard registra uma patente para um processo de Sinterização Seletiva a Laser (SLS). A patente foi emitida em 1989 para DTM, Inc., uma empresa posteriormente adquirida pela 3D Systems [32,35].

Em 1989, Scott e Lisa Crump solicitam uma patente para o processo de Modelagem por Deposição Fundida (FDM). Scott Crump continuaria a fundar a empresa Stratasys. Neste mesmo ano, Hans Langer estabelece a EOS GmbH na Alemanha e se torna um líder da indústria em pesquisa de sinterização a laser [32].

Em 1997, a AeroMat produziu a primeira amostra de metal impresso em 3D usando a Manufatura Aditiva a Laser (LAM), processo esse que utiliza lasers de alta potência para fundir ligas de titânio em pó. Posteriormente, em 1999, o Instituto Wake Forest de Medicina Regenerativa produz o primeiro órgão impresso em 3D para cirurgia de transplante, uma bexiga urinária desenvolvida em laboratório [32].

Em 2005, Dr. Adrian Browyer inventa o conceito de código aberto RepRep para criar a autorreplicação do processo de impressão 3D. Tal feito contribuiu consideravelmente para a criação de várias novas impressoras 3D. Logo em 2008, “Darwin” tornou-se a primeira impressora 3D comercialmente disponível projetada com o código aberto RepRep [32,36] Também em 2008, Shapeways cria um serviço de impressão 3D, o qual permite que os usuários enviem seus próprios arquivos para serem fabricados [32,37].

Em 2009, a patente do processo de FDM detida anteriormente pela Stratasys expira. Isso fez com que o preço médio da impressora 3D que imprime sob a metodologia FDM caísse de US \$ 10.000 para menos de US \$ 1.000. Nesse mesmo ano, a Makerbot leva a impressão 3D para uma convencional plataforma de faça você mesmo, distribuindo kits para pessoas que queiram construir suas próprias impressoras 3D. A Makerbot também cria a biblioteca de arquivos Thingiverse permitindo que os usuários enviem e façam downloads de arquivos 3D imprimíveis, tornando assim a maior comunidade de impressão 3D online e de repositório de arquivos 3D. A Makerbot viera a ser vendida em 2013 para a Stratasys, por cerca de US \$ 400 milhões [32].

Em 2011, no Reino Unido, a Universidade de Southampton projeta e imprime em 3D a primeira aeronave impressa em 3D não tripulada [32,38]. Em 2013, no Canadá, Kor Ecologic apresenta o Urbee, um protótipo de carro com carroceria impressa em 3D [32,39-40].

A Cellink, uma empresa sueca, apresenta ao mercado no ano de 2019 a primeira bio-tinta padronizada a ser comercializada, derivada de um material de alga marinha denominado alginato não celulose. A bio-tinta pode ser usada para imprimir cartilagem de tecido. Posteriormente, no final do ano, a Cellink lança a impressora 3D INKREDÍVEL para serviços de bioimpressão, criando assim um mercado acessível para a bioimpressão [32,41].

Com o vencimento de muitas patentes e os crescentes projetos de código aberto, atualmente existem mais de 170 fabricantes de sistemas de impressora 3D em todo o mundo. Esta lista inclui: Sistemas 3D, Stratasys, Fusion3, Formlabs, Desktop Metal, Prusa e Voxel8, entre muitos outros [32].

4.4.2 CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA

A norma EN ISO / ASTM 52921: 2017 [42] classifica os processos de MA em sete categorias diferentes, sendo elas: i) a Extrusão de Material, ii) a Fotopolimerização em Cuba, iii) o Jateamento de Material, iv) o Jateamento de Aglutinante, v) a Laminação de Folhas, vi) a Fusão em Cama de Pó e, vii) a Deposição de Energia Direta. Na Tabela 2, temos uma síntese dessa classificação, contendo assim, para cada um desses sete processos as suas tecnologias, a sua descrição, os materiais utilizados, e por fim, as suas vantagens e desvantagens.

Tabela 2 – As sete categorias da MA e suas descrições de acordo com a EN ISO / ASTM 52921: 2017 [6].

Categoria	Tecnologias	Descrição	Materiais Típicos Utilizados	Vantagens/Desvantagens
Extrusão de Material (Material Extrusion)	Fabricação com Filamento Fundido (Fused Filament Fabrication - FFF)	Processo em que o material é seletivamente extrudado através de um bico ou orifício.	Pelotas ou filamentos de polímeros termoplásticos, compostos, polímeros altamente preenchidos com metais ou cerâmicos. Tintas altamente preenchidas contendo um cerâmico ou pó metálico.	Equipamento barato. Grande variedade de materiais. Fácil de usar.
	Modelagem por Deposição de Material Fundido (Fused Deposition Modeling - FDM™)			Espaços de construção pequenos a grandes. Peças multimateriais são possíveis. /
	Escrita Direta com Tinta (Robocasting or Direct Ink Writing - DIW)			Superfície mais áspera, limitada pelo raio do bico. A precisão e a velocidade podem ser baixas. Anisotropia de propriedades. São necessárias estruturas de suporte.
Fotopolimerização em Cuba (Vat Photo-Polymerization)	Estereolitografia Stereolithographic apparatus (SLA)	Processo que utiliza fotopolimerização. O fotopolímero líquido é curado seletivamente por polimerização ativada por luz ultravioleta.	Resinas de fotopolímero curáveis por UV (com vários enchimentos).	Alto nível de complexidade e precisão. Acabamento de superfície liso. Acomoda grandes áreas de construção. /
	Processamento Digital de Luz Digital Light Processing (DLP)			Apenas foto-resinas. Monômeros líquidos podem ser prejudiciais.
	Varredura, Rotação e Fotocura Seletivamente (Scan, Spin, and Selectively Photocure - 3SP)			O deslizamento do material pode ocorrer após a cura. Necessita de pós-processamento longo. Estruturas de suporte podem ser necessárias. Equipamento caro.
Jateamento de Material (Material Jetting)	Produção Contínua da Interface Líquida (Continuous Liquid Interface Production - CLIP)	Processo em que gotículas do material de construção (como por ex. fotopolímero e cera) são seletivamente depositados.	Fotopolímeros, polímeros termoplásticos, ceras, compostos.	Alto nível de precisão. Permite peças coloridas. Peças multimateriais são possíveis. /
	Jatos (Polyjet)			São necessárias estruturas de apoio. Número limitado de materiais.
	Impressão de Curvas Suaves (Smooth Curvatures Printing - SCP)			
Jateamento de Aglutinante (Binder Jetting)	Modelagem Multi-Jato (Multi-Jet Modeling - MJM)	Processo no qual um adesivo líquido ou agente de ligação (aglutinante) é seletivamente depositado para unir materiais em pó.	Plásticos em pó, metais, cerâmicos, vidro e areia.	Altas taxas de construção volumétrica. Custo relativamente baixo (não metais). Permite a combinação de folhas de metal, incluindo componentes embutidos. /
	Impressão 3D (3D Printing - 3DP)			O acabamento depende do material usado. O pós-processamento é necessário.
	Tecnologia da ExOne™ Tecnologia da VoxelJet™			As propriedades dependem do adesivo usado Materiais limitados.

Tabela 2. Cont.

Categoria	Tecnologias	Descrição	Materiais Típicos Utilizados	Vantagens/Desvantagens
Laminação de Folhas (Sheet Lamination - SL)	Manufatura de Objetos em Lâminas (Laminated Object Manufacture - LOM)	Processo no qual as folhas de material são ligadas para formar o objeto.	Papéis, folhas de plástico, folhas/fitas metálicas.	Altas taxas de construção volumétrica. Custo relativamente baixo (não metais). Permite a combinação de folhas de metal, incluindo componentes embutidos.
	Deposição Seletiva de Lâminas (Selective Deposition Lamination - SDL)			/
	Manufatura Aditiva Ultrassônica (Ultrasonic Additive Manufacturing - UAM)			O acabamento depende do material usado. O pós-processamento é necessário. As propriedades dependem do adesivo usado. Materiais limitados.
Fusão em cama de pó Powder Bed Fusion	Sinterização de Metal Direta por Laser (Direct Metal Laser Sintering - DMLS)	Processo no qual a energia térmica funde seletivamente regiões superficiais de uma camada de pó.	Plásticos, metais, pós cerâmicos e areia.	Construção de peças com um alto nível de complexidade. O pó atua como material de suporte. Grande variedade de materiais disponíveis.
	Sinterização Seletiva a Laser (Selective Laser Sintering - SLS)			/
	Fusão Seletiva a Laser (Selective Laser Melting - SLM)			O equipamento é mais caro.
	Fusão por Feixe de Elétrons (Electron Beam Melting - EBM)			São necessários pós especiais são mais caros e podem ser prejudiciais.
	Fusão Multi-Jato (Multi-Jet Fusion)			Os pós podem envelhecer/oxidar facilmente.
	Tecnologia de Fusão a Jato da HP HP Jet Fusion™			O pós processamento geralmente é necessário.
Deposição de Energia Dirigida Directed Energy Deposition	Alta Velocidade de Sinterização High Speed Sintering - HSS	Processo no qual a energia térmica focalizada é usada para fundir materiais por fusão conforme o material está sendo depositado.	Fios metálicos, pós metálicos e pós cerâmicos.	Construção não limitada por direção ou eixo. Eficaz para adicionar recursos e reparos. Vários materiais podem ser depositados em uma única parte.
	Deposição de Metais a Laser Laser Metal Deposition - LMD			Maior taxa de deposição em um único ponto.
	Adição Volumétrica a Laser Laser Engineered Shaping - LENS			/
	Deposição Direta de Metal Direct Metal Deposition - DMD			Os pós podem ser prejudiciais. O acabamento depende do material. O pós-processamento é necessário. Materiais são limitados.

Fonte: Adaptado de Gonzalez-Gutierrez et al. (2018, p.4,5) [43].

4.4.3 ETAPAS DO PROCESSO GENERALIZADO DA MANUFATURA ADITIVA

Os processos para a produção de um modelo 3D impresso, usualmente obedecem às etapas mostradas na Figura 7.

Figura 7 - Processo generalizado da Manufatura Aditiva.



Fonte: Adaptado de Campbell et al. (2011) [44].

Primeiramente, um modelo 3D de Desenho Assistido por Computador (CAD) é preparado. Esse pode ser gerado a partir do zero, utilizando scanners 3D, por Tomografia Computadorizada (TC), ou ainda por Imagem por Ressonância Magnética (MRI) no caso dos implantes médicos.

Em seguida, o modelo CAD é analisado e otimizado com o auxílio de técnicas de otimização computacional, como a Análise de Elementos Finitos (FEA). Posteriormente, o modelo CAD será transformado em um arquivo Standard Triangulation ou Tessellation Language (STL) e importado para uma configuração AM.

O formato STL carece de muitos recursos, como por exemplo a dificuldade de distinguir cores ou materiais nas peças. Para suprir essa necessidade, a ASTM ISO implementou um novo formato, o Additive Manufacturing File Format (AMF) [45]. A exemplo do AMF, existem mais de 30 outras alternativas ao arquivo STL, três exemplos importantes das quais são OBJ, PLY e 3MF [46].

Subsequentemente, o arquivo STL ou outro formato contendo a forma geométrica precisa ser fatiado em camadas finas. Também, é necessária a programação do movimento da unidade de deposição ou fusão ("cabeça de

impressão") e do substrato ("plataforma de impressão"), bem como outros parâmetros que viabilizarão a impressão do objeto 3D. Tudo isso é preparado em um software que utiliza o código G, que é uma linguagem de programação de controle numérico.

Posteriormente deve-se realizar a especificação dos parâmetros, e a próxima etapa dá-se com uma máquina MA que irá imprimir o objeto tridimensional, camada por camada. Após a impressão, o objeto é removido da plataforma de construção. O excesso de material de construção não ligado precisa ser removido em uma etapa de limpeza, que dependerá do tipo de tecnologia MA a ser utilizada.

Por fim, pode ser necessário um pós-processamento adicional, como polimento, revestimento e tratamento térmico. Ainda, como a exemplo do uso da tecnologia FFF, a qual foi empregada neste trabalho, a remoção do aglutinante seguido da sinterização são processos necessários para a obtenção de uma peça funcional.

4.4.4 APLICAÇÕES DA MANUFATURA ADITIVA

A MA é uma realidade nos mais variados setores da economia mundial. Será abordado neste capítulo, algumas das aplicações da MA na indústria aeronáutica, na indústria automobilística e na área da saúde.

Indústria Aeronáutica

Na área da aeronáutica, a MA possui um enorme impacto. A redução de cada quilograma no peso de uma aeronave evita, aproximadamente, durante a sua vida útil a emissão de 25 toneladas de gás carbônico (CO_2). As peças produzidas por MA pesam até 55% menos e podem reduzir a matéria-prima utilizada em até 90%, fazendo com que a impressão 3D de componentes para o setor aeronáutico ganhe grande notoriedade. Outra grande vantagem da MA para os projetos aeronáuticos é que as novas peças podem ser projetadas, impressas e testadas em um período de tempo muito curto. [47].

Temos em 2011, utilizando a MA, a criação da primeira aeronave impressa do mundo. Os engenheiros aeroespaciais da Universidade de Southampton projetaram, construíram e voaram a SULSA (Southampton University Laser

Sintered Aircraft). Toda a sua estrutura foi impressa, desde as asas até as superfícies de controle integrado [38].

Em 2017, após a aprovação da EASA (Agência Europeia para a Segurança da Aviação), a Airbus foi a pioneira a ter uma peça de titânio 3D, produzida por MA, incorporada ao processo de produção em série de aeronaves [47]. Este passo foi extremamente importante, visto que a Impressão 3D pode viabilizar e facilitar a obtenção de componentes com geometrias complexas garantindo um bom padrão de segurança e qualidade.

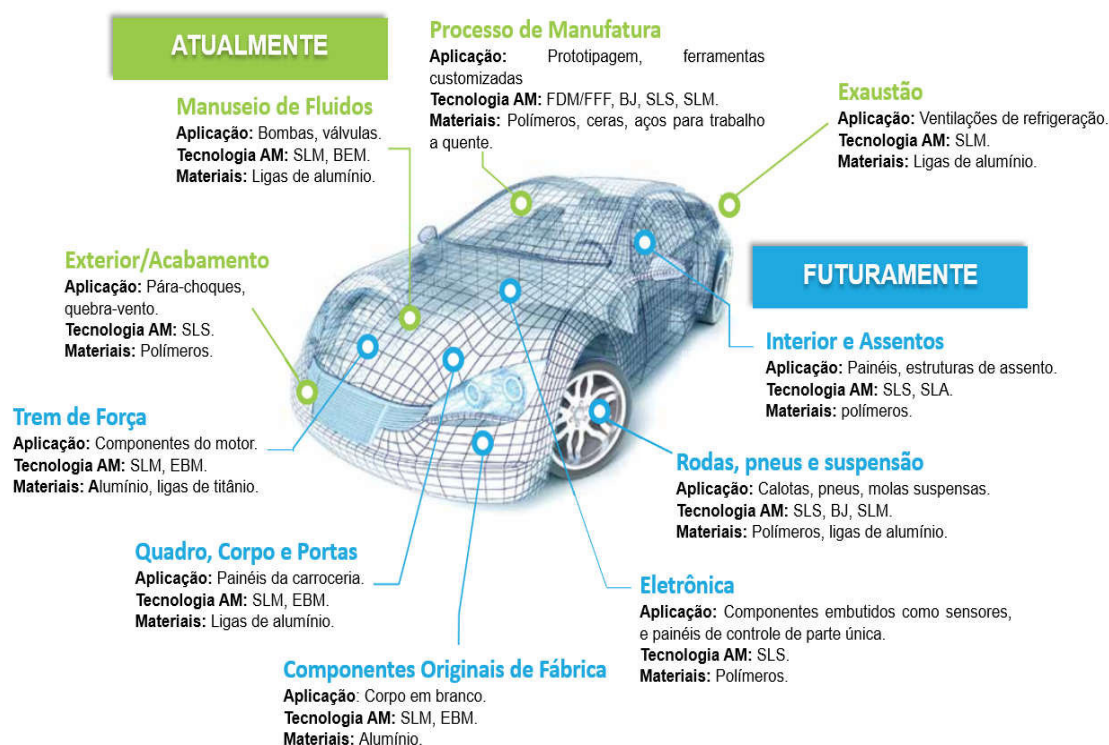
Na busca pela redução de massa, casos práticos de engenharia nos últimos anos provaram que a combinação adequada de otimização de topologia e tecnologias da MA resultam em uma abordagem eficaz para os projetos de estruturas de alto desempenho [48-49]. A Companhia Europeia de Defesa Aeronáutica e Espacial (EADS) obteve o design inovador do suporte de dobradiça do Airbus A320 usando a otimização da topologia e tecnologias de fabricação aditiva tendo uma redução de 64% da massa com relação ao projeto original [50]. Também utilizando a otimização da topologia juntamente com técnicas de MA, Shi et al. (2020) [51], remodelaram um suporte aeroespacial, atingindo uma redução de 18% da massa estrutural, garantindo a satisfação de todos os desempenhos mecânicos necessários do projeto original.

Indústria Automobilística

A exemplo da indústria aeronáutica, um dos principais requerimentos que o setor automobilístico necessita é a redução de peso dos componentes utilizados nas fabricações dos autos. Além de possibilitar a manufatura de peças mais leves, a MA permite criar geometrias complexas, que podem resistir a temperaturas acima da média dos 105° C para os componentes perto do motor ou ainda, que podem ser resistentes ou à prova d'água [52].

Devido à grande variedade e versatilidade de matéria-prima utilizada nas impressões 3D da MA, vários tipos de componentes podem ser fabricados para o setor automobilístico. Temos como exemplos, escapamentos, para-choques, painéis, estruturas de assento, pneus, calotas, molas de suspensão, portas, dentre vários outros [52-53], como ilustra a Figura 8.

Figura 8 – MA aplicada no setor automobilístico.



Fonte: Adaptado de Deloitte (2014) [53].

Área da Saúde

Na área da saúde, a MA permite soluções sob demanda para uma ampla gama de necessidades, que vão desde os equipamentos de proteção pessoal a dispositivos médicos e até mesmo enfermarias de isolamento. Um grande e oportuno uso dessa tecnologia inovadora e versátil está ligada a solução de desequilíbrios de oferta e demanda causados por tendências socioeconômicas e interrupções nas cadeias de abastecimento [54].

Outro grande e inovador uso da MA foi na atual pandemia da COVID-19 (2019-2022). As máscaras Venturi são utilizadas para misturar o oxigênio puro das linhas hospitalares com o ar do hospital, com a finalidade de produzir um ar mais oxigenado, acima da composição natural de 21%. Para realizar tal feito, essas máscaras contam com uma válvula especial que pode ser facilmente quebrada devido às suas retiradas e trocas. Em Brescia, na Itália, devido ao grande colapso da doença, havia falta tanto de máscaras quanto de válvulas. Uma solução para esse momento tão importante, e desenvolvida por Cristian Fracassi, CEO da

empresa *Isinnova*, foi a reprodução e, portanto, a impressão dessas válvulas utilizando a MA [55].

4.5 USO DE TECNOLOGIAS DE MA INCORPORADAS AO PROCESSO DE PRODUÇÃO MIM

Uma das grandes características do emprego da tecnologia MIM é o seu alto custo para a produção unitária ou de pequenos lotes. Essa desvantagem deve-se, principalmente, ao elevado gasto a ser despendido na criação dos moldes a serem utilizados para as etapas de prensagem e de fundição durante a fabricação da peça verde. Por conseguinte, o uso da MA para a confecção das peças verdes reduz significativamente os custos de produção dessa etapa, expandindo e aumentando a viabilidade da fabricação de componentes utilizando o processo MIM [56-60]. Temos então, uma sequência de processos, impressão da peça verde com a manufatura aditiva (modelagem) seguida dos processos de extração de ligantes e sinterização. O conjunto dessas etapas é conhecido como SDS - *Shaping, Debinding and Sintering* [61-62].

Dentre as sete categorias da MA EN ISO / ASTM 52921: 2017 [43] descritas na Tabela 2, duas delas são capazes de integrar o processo MIM na produção da peça verde, sendo uma delas o Jateamento de Aglutinante e a outra categoria Extrusão de Material (com as tecnologias Fabricação com Filamento Fundido - FFF ou Modelagem por Deposição de Material Fundido – FDM). No processo de Jateamento por Aglutinante os pós metálicos e o aglutinante são utilizados separadamente, enquanto que nos processos FFF/FDM essa matéria prima é uma mistura [60].

4.5.1 TECNOLOGIA JATEAMENTO DE AGLUTINANTE (BINDER JETTING)

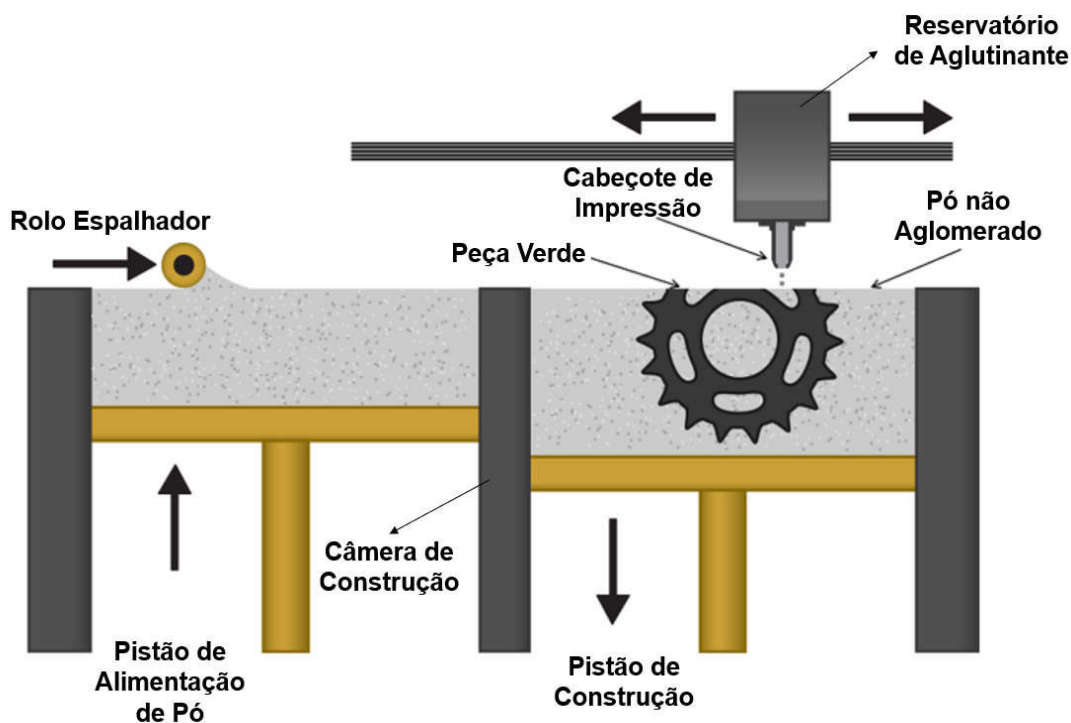
A impressão utilizando o processo MA *Binder Jetting* (BJ), representada pela Figura 9, tem o seu início com o suprimento de pó, sendo feita por um pistão e um rolo de rotação contrária que irá distribuir uma fina camada de pó para o topo da câmara de construção. Após, um cabeçote de impressão a jato de tinta, multicanal, depositará o aglutinante nas regiões específicas do leito de pó para a criação do padrão 2D para a camada. Então, a camada de construção irá abaixar,

será adicionada uma nova camada de pó para que a próxima camada seja construída, e esse processo será repetido até o término da peça verde. [63-64].

Após a impressão da peça verde, na tecnologia MIM, são necessários como etapas de pós-processamentos os processos de *debinding* e de sinterização para a completa remoção do aglutinante e melhora das propriedades mecânicas da peça.

A maioria dos ligantes utilizados no BJ é baseada em compostos orgânicos que se decompõem termicamente. O *debinding* é uma etapa crítica e eficaz para a obtenção de melhores propriedades, precisão e consistência. No entanto, há poucos trabalhos publicados acerca desse pós-processamento nos componentes criados sob a manufatura BJ. Quanto ao processo de sinterização, se as partículas forem suficientemente pequenas e o corpo verde for consideravelmente denso, o corpo impresso pode se aproximar da densidade total (>99 % teórico) [63].

Figura 9 – Representação esquemática da tecnologia *Binder Jetting* na produção de peças verdes para o processo MIM.



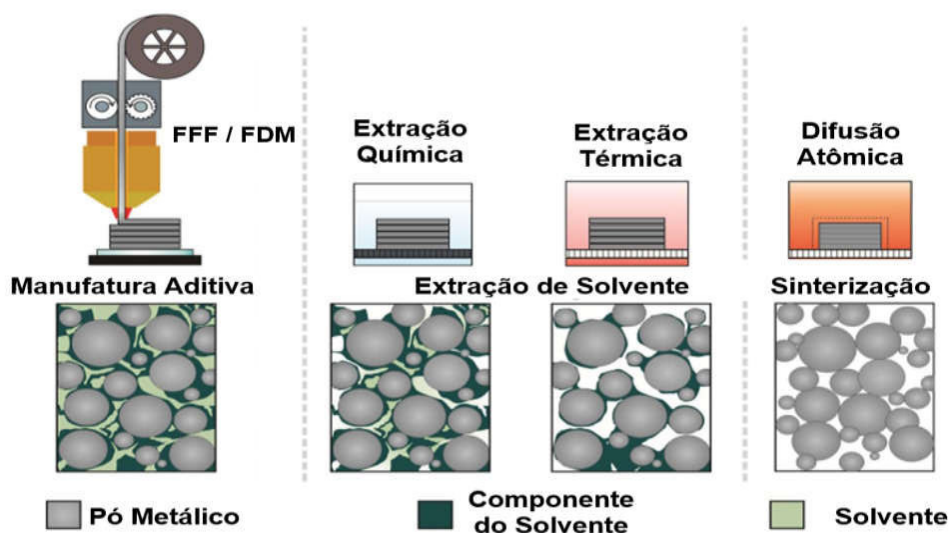
Fonte: 3DEO Co. (2022) [65].

4.5.2 TECNOLOGIA FDM/FFF

Não há diferenças entre as tecnologias de manufatura FFF e FDM. As diferentes terminologias tratam-se de questões comerciais. O processo FDM foi desenvolvido e patenteado pela empresa *Stratasys Inc.* Como as outras empresas não podiam utilizar o nome FDM para referenciar seus processos, o termo FFF foi criado a fim de permitir que outras pessoas e companhias discutam e utilizem essa metodologia de manufatura [43,66-69].

Neste modelo, exemplificado pela Figura 10, um filamento de polímero, continuamente alimentado por um liquefator, é fundido e extrudado por um bico que após sucessivas camadas irá construir a peça final. Essa tecnologia oferece baixo custo de fabricação, flexibilidade no projeto estrutural e operação livre de supervisão [70-71].

Figura 10 – Representação esquemática da morfologia e das etapas da tecnologia FDM/FFF incorporada ao processo MIM.



Fonte: Adaptado de Gonzalez-Gutierrez et al. (2018, p.10) [43].

Muitos dos filamentos de metais disponíveis no mercado, possuem uma baixa porcentagem de carga (pós metálicos). Assim, as impressões utilizando esses filamentos, tem em sua maioria, apenas fins decorativos [72]. Para contornar esse problema, a empresa BASF criou um produto denominado *UltraFuse 316 LX Filament* para ser impresso em uma impressora *desktop* FFF e subsequentemente

processado pelas etapas de extração do aglutinante e sinterização, permitindo a produção segura, simples e econômica de peças totalmente metálicas para aplicações em protótipos, ferramentas e peças funcionais. O alto teor de metal no filamento (cerca de 90%) e a sua distribuição uniforme dentro da matriz do ligante, reduzem o risco de defeitos e consequentemente, aumenta a taxa de sucesso da impressão [73].

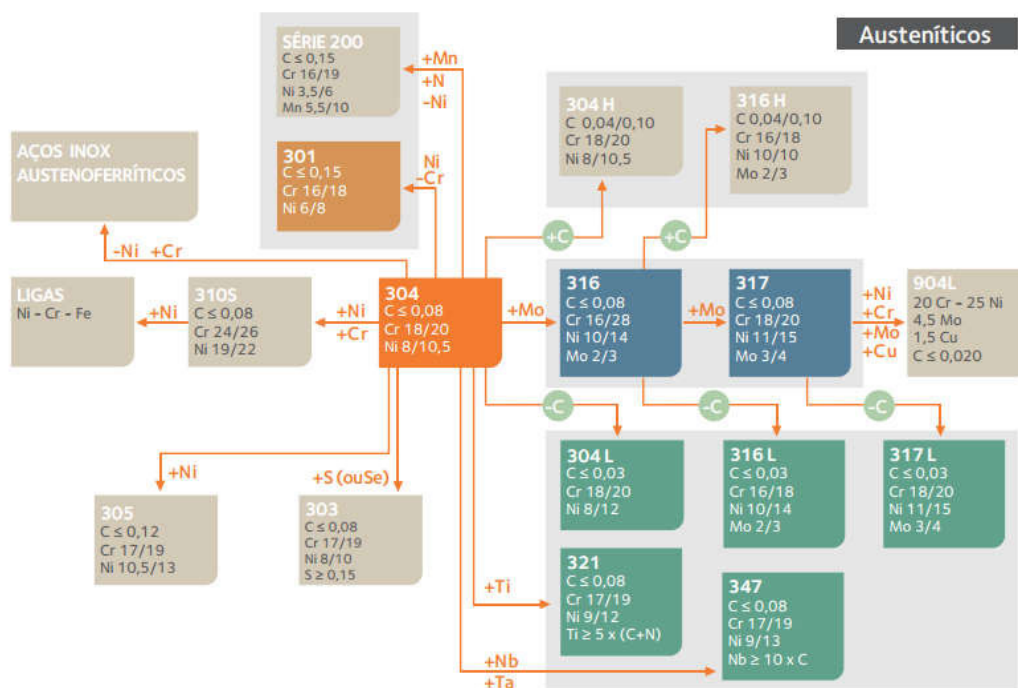
4.6 AÇOS INOXIDÁVEIS E SUAS APLICAÇÕES

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro (Fe), carbono (C) e cromo (Cr) e outros componentes, contendo no mínimo 10,50% de teor de cromo, elemento esse que confere a essa classe de aços uma elevada resistência à corrosão. Ainda, apresentam excelente ductilidade e soldabilidade e podem ser aplicados tanto em temperaturas altas (até 1150 °C) como baixas (condições criogênicas) [74]. Os aços inoxidáveis são classificados em Ferríticos, Austeníticos, Martensíticos, Duplex e Endurecíveis por Precipitação. As subseções posteriores irão abordar os aços 316L e 17-4 PH, classificados como austeníticos e endurecíveis por precipitação, respectivamente. Esses tipos de aços estão dentre os mais utilizados nas impressões tridimensionais atuais.

4.6.1 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

Os aços inoxidáveis austeníticos (ver Figura 11), recebem esse nome devido à adição de elementos como níquel (Ni) e manganês (Mg), estabilizadores da fase austenita à temperatura ambiente. Os austeníticos não sofrem alterações alotrópicas durante a mudança de temperatura, ou seja, ele conservará a sua estrutura CFC, o que conferem a esse tipo de aço inoxidável a propriedade de serem não magnéticos, consequentemente, favorecendo a ductilidade e a tenacidade [75].

Figura 11 – Classificação dos aços inoxidáveis austeníticos de acordo com a sua composição.



Fonte: Carbó (2008, p.17) [74].

Pela Figura 11 podemos observar que o aço inoxidável austenítico 316 possui em sua composição menos que 0,08 % de C, 16 a 28 % de Cr, 10 a 14% de Ni, e 2 a 3% de Mo. Quando submetido a temperaturas entre 425 a 850°C, o carbono e o cromo se combinam e formam precipitados e carboneto de cromo (Cr_{23}C_6) causando o empobrecimento de Cr nos contornos de grãos, fenômeno conhecido como sensitização. Isso resultará em corrosões intergranulares, uma vez que o Cr não estará ali para proteger o aço contra a oxidação. Por sua vez, o 316L, possuindo menos que 0,03 % de C, 16% a 18% de Cr, 10 a 14% de Ni, e 2 a 3% de Mo, é uma versão baixo carbono do 316, que o torna utilizável na fabricação de equipamentos que venha a trabalhar em meios capazes de provocar corrosão em materiais sensitizados [74].

Filamento de aço 316L para MA em impressoras FFF/FDM

Um dos tipos de filamentos mais utilizados é o comercial *Ultrafuse 316LX*, da BASF [76], que é composto de uma mistura metal-polímero, contendo em sua

composição um volume de pó metálico superior a 80%. Após a manufatura em impressoras do tipo FFF/FDM e as etapas de *debinding* e sinterização, esse material possibilita a produção de componentes em aço inoxidável austenítico do tipo 316L, possuindo aproximadamente, dureza *Vickers* de 120 HV₁₀, 174 MPa e 550 MPa de tensão de escoamento e de tensão de ruptura, respectivamente.

Safka et al. (2020) [77] avaliaram as propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 316L laminado convencional com outros dois materiais, também da AISI 316L, porém obtidos por MA diferentes. O primeiro deles se trata do material obtido pelo processo FFF utilizando o filamento *Ultrafuse316LX* e a máquina *Felix Tec4*, o segundo processamento é o resultado do material AISI 316L aplicando a tecnologia aditiva SLM através do equipamento *SLM280HL*. Através dos ensaios de tração, constatou-se que dentre todos os processos: o *Ultrafuse 316LX* possui a maior ductilidade e também os menores valores de tensão de ruptura e de tensão de escoamento; os espécimes obtidos por SLM são os mais frágeis e os que apresentam maiores variações nos seus resultados, no entanto possuem tensão de ruptura e tensão de escoamento semelhantes ao 316 laminado, resultados esses que são maiores que o *Ultrafuse 316LX*. O processo obtido pela técnica FFF mostrou-se interessante por possuir propriedades mecânicas aceitáveis e uma alta ductilidade.

Thompson et al. (2019) [78] imprimiram peças verdes para integração ao processo MIM. Um filamento contendo 55% de volume de pó do aço 316 L foi fundido pela técnica de manufatura FFF. O *debinding* químico, para a remoção dos elastômeros termoplásticos, foi realizado com a imersão em ciclohexano a uma temperatura de 65 °C durante 57 horas para a espessura de 6mm da peça. Já o *debinding* térmico foi realizado a 750 °C por 90min e permitiu a completa remoção da poliolefina, aglutinante secundário. A sinterização ocorreu a 1360 °C durante 120 min, permitindo a eliminação de poros e obtenção de uma densidade final de 95,0 %. A retração com relação a largura e altura, foram respectivamente de 16,3 e 17,4 %. Embora possuam uma resistência mecânica inferior se comparado com os aços inoxidáveis fabricados convencionalmente, os ensaios mecânicos de flexão em 3 pontos apontaram que as deflexões entre os dois métodos são semelhantes. Tais resultados tornam o processo SDS uma técnica promissora para a confecção de peças para aplicações em que o foco seja a funcionalidade do material.

Kurose et al. (2020) [79], estudaram na fabricação de componentes metálicos utilizando a manufatura FDM/FFF, sob um filamento composto de 60% de pó metálico 316L, a influência dos seguintes parâmetros construtivos: direção de impressão; espessura da peça; e contração do produto final. A maior tensão de ruptura encontrada foi de 453 MPa para uma deformação de 48% foi obtida no corpo de prova que teve suas camadas impressas no sentido perpendicular à direção de tração. Ainda, as direções tiveram pouca interferência sobre a densidade relativa das partes finais, na qual o maior valor dessa propriedade encontrada foi de 92,9%. As peças contendo espessuras de camada igual a 0,1 mm apresentaram densidades relativas maiores se comparadas com as de espessura igual a 0,3 mm. Com relação a contração da peça, essa característica foi maior no sentido de impressão adotado, com uma contração média de 15 – 17% contra 14 – 15% nas outras direções perpendiculares.

4.6.2 AÇOS INOXIDÁVEIS ENDURECIDOS POR PRECIPITAÇÃO

Os aços inoxidáveis endurecidos por precipitação (*PH – Precipitation Hardenable*) podem possuir uma matriz austenítica ou martensítica e são produzidos através das etapas de solubilização e envelhecimento. Na solubilização, elementos de ligas como cobre (Cu), alumínio (Al), titânio (Ti), nióbio (Nb) e molibdênio (Mo) são dissolvidos no aço austenítico e, posteriormente esse será resfriado rapidamente, formando uma solução sólida supersaturada. Então, vem a etapa de envelhecimento, na qual o aço é submetido a uma temperatura inferior àquela necessária para a solubilização. Nesse último processo, os compostos intermetálicos dissolvidos irão precipitar-se, fazendo com que o aço tenha um aumento da sua dureza e resistência mecânica sem a presença de distorções, empenamentos e trincas comumente associados ao tratamento térmico de têmpera [80].

A Tabela 3 traz a composição química de alguns tipos de aços inoxidáveis endurecidos por precipitação. Observe que em alguns casos a nomenclatura é do tipo **%Cr-%Ni PH**, dessa forma, já é possível identificar a quantidade aproximada do elemento Cr e Ni na liga.

Tabela 3 – Composição química de alguns tipos de aços inoxidáveis endurecidos por precipitação.

Ligas	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Outros
Martensíticos									
PH13-8Mo	0,05	12,25-13,25	7,5-8,5	2,0-2,5	0,10	0,10	0,01	0,008	0,90-1,35Al; 0,01N
15-5PH	0,07	14,0-15,5	3,5-5,5	---	1,00	1,00	0,04	0,03	2,5-4,5Cu; 0,15-0,45Nb
17-4PH	0,07	15,0-17,5	3,0-5,0	---	1,00	1,00	0,04	0,03	3,0-5,0Cu; 0,15-0,45Nb
Custom 450	0,05	14,0-16,0	5,0-7,0	0,5-1,0	1,00	1,00	0,03	0,03	1,25-1,75Cu; (8%Cmin.)Nb
Custom 455	0,05	11,0-12,5	7,5-9,5	0,5	0,50	0,50	0,04	0,03	1,5-2,5Cu; 0,8-1,4Ti; 0,1-0,5Nb
Austeníticos									
A-286	0,08	13,5-16,0	24,0-27,0	1,0-1,5	2,00	1,00	0,025	0,25	1,9-2,35Ti; (0,35máx.)Al; 0,1-0,5V; 0,003-0,01B
Semi-austeníticos									
PH15-7Mo	0,09	14,0-16,0	6,50-7,75	2,0-3,0	1,00	1,00	0,04	0,04	0,75-1,50Al
17-7PH	0,09	16,0-18,0	6,50-7,75	---	1,00	1,00	0,04	0,04	0,75-1,50Al
AM-350	0,07-0,11	16,0-17,0	4,0-5,0	2,50-3,25	0,50-1,25	0,50	0,04	0,03	0,07-0,13N
AM-355	0,10-0,15	15,0-16,0	4,0-5,0	2,50-3,25	0,50-1,25	0,50	0,04	0,03	0,07-0,13N

Fonte: Stephen Lamb (1999) [81].

A Tabela 4 traz os tratamentos térmicos usuais presentes para todos os aços endurecidos por precipitação listados acima.

Tabela 4 – Tratamentos térmicos usuais para os aços inoxidáveis endurecidos por precipitação.

Ligas	Tratamento de solubilização	Condicionamento da austenita	Transformação martensítica	Envelhecimento
Martensíticos				
PH13-8Mo	925°C, 30min	---	---	510-620°C, 4h
15-5PH	1035°C, 30min	---	---	480°C, 1h; 495-620°C, 4h
17-4PH	1035°C, 30min	---	---	480°C, 1h; 495-620°C, 1h
Custom450	1035°C, 1h	---	---	480-620°C, 4h
Custom455	830°C, 1h	---	---	480-535°C, 4h
Austeníticos				
A-286	900°C, 2h	---	---	730°C, 16h
Semi-austeníticos				
PH15-7Mo	1065°C, 30min	955°C, 10min	Resfriamento a 75°C, 8h	510°C, 1h
17-7PH	1065°C, 30min	760°C, 90min	Resfriamento a 15°C, 30min	565°C, 90min
AM-350	1065°C, 90min	930°C, 90min	Resfriamento a 75°C, 3h	455°C, 3h
AM-355	1025°C, 30min	930°C, 90min	Resfriamento a 75°C, 3h	535°C, 3h

Fonte: Stephen Lamb (1999) [81].

Filamento de aço 17-4 PH para MA em impressoras FFF/FDM

Além do *Ultrafuse 316LX* [76], a BASF também produz o *Ultrafuse 17-4 PH* [82], filamento para impressoras do tipo FFF/FDM. Composto por uma mistura metal-polímero, na qual a composição em volume de pó metálico de aproximadamente é 90%, o *Ultrafuse 17-4PH* requer um *debinding* catalítico com ácido nítrico (HNO_3) a uma temperatura de 120°C. As propriedades mecânicas dos componentes impressos dependem da direção da impressão. O processo de sinterização é composto pelo ciclo: com uma taxa de 5°C/min, aquecer o forno até 600°C; quando chegar nesse limite, manter a temperatura por durante uma hora;

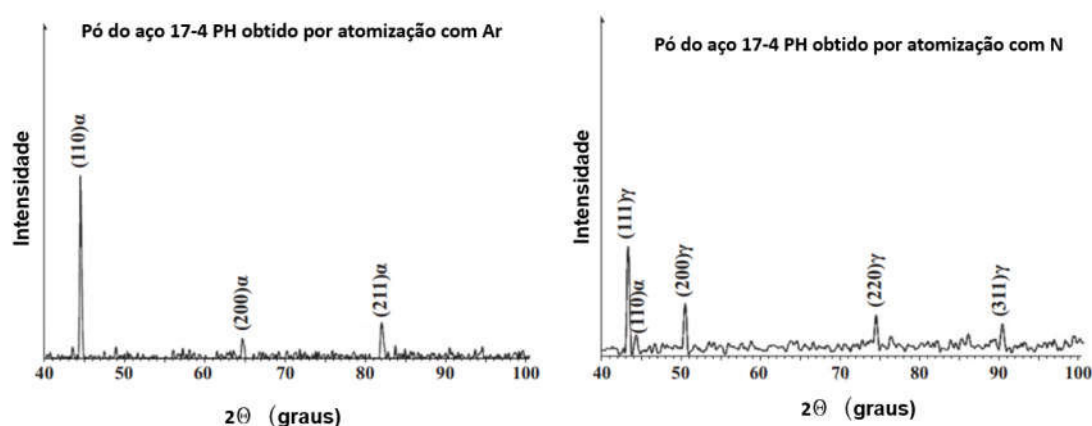
utilizando a mesma taxa de aquecimento, injetar calor até o forno atingir 1300°C; permanecer por 3 horas e depois deixar a peça resfriar dentro do forno. Se imprimidos no plano horizontal apresentam tensão de ruptura de 760Mpa, tensão de escoamento de 680Mpa. Por outro lado, quando imprimidos no plano vertical, esses valores mudam para 730Mpa e 700Mpa, respectivamente. A dureza *Vickers* das amostras impressas é 257 HV₁₀ [83].

No trabalho de Singh et al. (2021) [84], foram utilizados os processos MA e MIM para a produção de componentes de aço inoxidável 17-4PH. As peças verdes manufaturadas por uma impressora do tipo FFF/FDM passaram pelos processos de *debinding* químico e térmico. O *debinding* químico ocorreu com a imersão da peça verde em uma solução aquosa a 60°C por 4 horas, enquanto o térmico ocorreu a uma temperatura de 500 °C. Foram realizados vários processos de sinterização por 3 horas, em temperaturas de 1100, 1200, 1300 e 1360°C. A peça menos porosa, foi obtida na maior temperatura de sinterização (1360° C), possuindo uma densidade de volume de aproximadamente 95,6%, tendo a mesma sofrido uma redução de 14,1%. A maior dureza encontrada foi de 400 HV para as amostras sinterizadas a partir de 1200°C não tendo diferenças significativas para temperaturas superiores a essa. Devido ao grande número de porosidade, as peças verdes apresentaram baixa resistência mecânica. No entanto, as peças marrons (sinterizadas) apresentaram uma resistência à tração de 939,5 MPa.

Murr et al. (2012) [85] utilizaram pós metálicos 17-4 PH produzido por dois diferentes tipos de atomização: em Argônio (Ar) que resultou em um aço com estrutura martensítico e em Nitrogênio (N) que resultou em uma estrutura predominantemente austenítica. Esses pós metálicos foram utilizados para a confecção de componentes por MA em uma impressora do tipo SLM (do inglês, Fusão Seletiva a Laser) com atmosfera controlada, também pelos gases de Argônio e Nitrogênio. A impressão na atmosfera controlada de gás Argônio, resultou em componentes MA com estrutura martensítica tanto para os pós atomizados por Argônio como por Nitrogênio. Já a impressão na atmosfera controlada de gás Nitrogênio não interferiu na estrutura cristalina do pó utilizado como matéria-prima, ou seja, as peças produzidas com pós atomizados por Argônio apresentaram estrutura martensítica, enquanto àquelas produzidas com pós atomizados por Nitrogênio apresentaram estrutura majoritariamente austenítica. A DRX dos pós metálicos obtidos nesse estudo pode ser vista na Figura 12.

As amostras de 17-4PH preparadas por Huber (2021) [86], foram produzidas pelo método Jateamento de Aglutinante 3DP (*3D Printing* – Impressão 3D) na qual uma solução aquosa foi seletivamente jateada nos pós metálicos. A peça verde, após ser impressa, sofreu também um processo de cura a 180°C por 6 horas. O *debinding* térmico foi efetuado em três etapas: 450 °C por 120 min, 600 °C por 150 min e 650 °C por 30 min. Vários ensaios com diferentes processos sinterização foram realizados: fixando a temperatura de sinterização em 1300° C e executando esse processo por 30, 60, 90, 180 minutos e também, fixando o tempo de 30 minutos nas temperaturas de 1270, 1300, 1330, 1360°C. As melhores propriedades mecânicas obtidas, tensão de ruptura de 1050Mpa com um alongamento maior que 4,0 %, uma microdureza de 330 HV10 e uma porosidade inferior a 1,0 %, ocorreram no processo com a sinterização a uma temperatura de 1300°C por 90 minutos.

Figura 12 – DRX dos pós metálicos do aço inoxidável 17-4 PH produzidos sob diferentes atmosferas de atomização.



- a) DRX do pó do aço inoxidável 17-4 PH atomizado com Argônio (matriz martensítica). b) DRX do pó do aço inoxidável 17-4 PH atomizado com Nitrogênio (matriz austenítica).

Fonte: Adaptado de Murr et al. (2012) [85].

4.7 TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS

A superfície de um componente mecânico é diretamente afetada por efeitos mecânicos, físicos e químicos (intempéries ambientais). Geralmente, também se trata do primeiro local a receber carregamentos, sendo muitas vezes submetidas à fricção e abrasão [87-89]. Ainda, muitas operações de trabalho requerem componentes com elevada dureza e que também possuam uma boa capacidade de absorção de impactos. Os tratamentos termoquímicos endurecem apenas a superfície dos aços, preservando a tenacidade do núcleo do material, sendo, portanto, uma solução indicada para os componentes mecânicos sob as condições de trabalho mencionadas. Outras soluções seriam a têmpera superficial [89] e a aplicação de filmes *DLC* (*Diamond Like Carbon*) [90].

São exemplos de tratamentos termoquímicos: cementação, nitretação, nitrocementação, cianetação, boretação, aluminização, cromização, entre outros. Neste trabalho foi utilizado o tratamento termoquímico de nitretação, esse que será abordado e aprofundado nas próximas subseções.

4.7.1 NITRETAÇÃO

A nitretação dos aços trata-se de um processo termo-químico em que a superfície do material é endurecida devido a sua distorção do reticulado cristalino, causada pela difusão de átomos de nitrogênio e também pela precipitação de nitretos (compostos entre nitrogênio e átomos de ferro e ou elementos de liga) [91]. Dessa forma, um aço submetido ao processo de nitretação apresentará três camadas: a camada de compostos ou camada branca, a camada de difusão e por fim, a camada de substrato.

A camada de compostos ou camada branca é a camada mais superficial de um aço nitretado que pode ser formada por nitretos dos tipos Fe_23N (ϵ), de estrutura hexagonal compacta (HC) e/ou de nitretos de $Fe4N$ (γ'), de estrutura cúbica de face centrada (CFC). Quando a camada de compostos é formada apenas por um único tipo de nitreto, seja ele o do tipo Fe_23N (ϵ), ou o do tipo $Fe4N$ (γ'), teremos uma camada nitretada mais resistente. Por outro lado, uma camada não homogênea, ou seja, com a presença de ambos os nitretos Fe_23N (ϵ) e $Fe4N$ (γ') terá propriedades

mecânicas inferiores devido às diferenças entre os coeficientes de dilatação térmica dos nitretos bem como da fraca ligação de suas interfaces [92].

Já a cama de difusão é formada logo abaixo da camada de compostos e consiste-se de uma solução sólida e de finos precipitados de nitretos e/ou carbonitretos de ferro, nos quais os átomos de nitrogênios ocupam posições intersticiais [93].

Por fim, a camada de substrato trata-se do material base, ou seja, é o núcleo do material não afetado termoquimicamente pelo processo de nitretação.

Os tipos de nitretação a serem discutidos aqui serão a líquida, por plasma (ou iônica), e a gasosa.

Nitretação Líquida

A nitretação líquida foi desenvolvida na década de 1940. Sua realização deve-se à imersão do componente mecânico em um banho de sais fundidos, à altas temperaturas, contendo nestes elementos como cianetos, cianatos, bário, estrôncio, nitratos, nitritos dentre outros [94].

A principal vantagem da nitretação líquida é o curto tempo do processo que é atribuído ao intenso aquecimento e a alta reatividade do meio. Como desvantagens temos a toxicidade dos elementos presentes no banho e a má qualidade da superfície nitretada. Para um aço baixa liga, usualmente, a combinação de uma temperatura de operação de 565 °C para um tempo de 1,5 horas produz uma camada nitretada de 0,3mm de espessura [88].

Zhang et al. (2018) [95] investigaram o comportamento de erosão e de corrosão de um aço 316L sem e após sofrerem o processo de nitretação líquida a baixas temperaturas. A nitretação ocorreu em um banho de sal fundido de isocianato (composto orgânico contendo o grupo funcional $-N = C = O$) não tóxico a 430°C por um tempo de 8 horas. A perda de material para o aço nitretado é dominada pela corrosão, enquanto que para os materiais não nitretados é dominada pela erosão. O aço 316 L nitretado exibiu uma melhoria de quase 84% na resistência à corrosão e erosão em comparação com o seu equivalente não nitretado. Portanto, a perda de peso para as amostras não nitretados foi muito maior se comparadas com as nitretadas.

Nitretação por Plasma ou Iônica

A nitretação por plasma, também conhecida por nitretação iônica, foi inventada em 1932 por Wehnheldt e Berghause. Nesse processo, o fenômeno de descarga luminescente é utilizado para introduzir o gás nitrogênio na superfície de uma liga e sua subsequente difusão para as camadas internas do material [96].

O plasma é formado no vácuo, sendo este composto por um gás de nitrogênio, parcialmente ionizado, contendo íons e elétrons em equilíbrio dinâmico. As peças de aço a serem tratadas são submetidas a um campo elétrico negativo, fazendo com que os íons de nitrogênio sejam acelerados, por difusão térmica, para a superfície da liga. Dentre as vantagens dessa tecnologia estão as baixas temperaturas aplicadas (de 350 a 550 °C) e o curto tempo de saturação. [97-98].

Silva Junior (2016) [99] abordou a influência da nitretação à plasma sobre a resistência à fadiga do aço API 5L Grau B. Foram investigadas as propriedades mecânicas de vida em fadiga, limite de resistência à fadiga, limiar de propagação de trincas e microdureza *Vickers*. Quanto aos parâmetros de nitretação à plasma, foram utilizados os tempos de 8, 24 e 46 horas, e uma temperatura de 515°C com pressões de 2.6, 2.8 e 2.9 mbar, respectivamente, e uma mistura gasosa contendo 80% vol. de H_2 e 20% vol. de N_2 . Os materiais nitretados apresentaram, para os três casos, ganhos aproximados de: aumento da vida em fadiga com ganhos significativos em todos os casos, 40% de aumento do limite de resistência à fadiga, 250% de aumento do limiar de propagação de trincas (ΔK_{th}) e 200% de ganho na microdureza *Vickers*.

Riazi et al. (2017) [100] avaliaram o comportamento de fadiga de aço inoxidável 17-4 PH após as etapas simultâneas de envelhecimento e de nitretação a plasma. O aço nitretado a 500 °C por 5 horas apresentou dureza de núcleo e de superfície de 344 e 1848 HV, respectivamente. Já para o aço nitretado a 400 °C por 5 horas, esses valores foram de 403 e 862 HV. As amostras com um maior tempo e temperatura de nitretação obtiveram um aumento da tensão residual e, conseqüentemente, uma maior dureza superficial, ao passo que as amostras nitretadas a plasma em temperaturas mais baixas apresentaram uma maior dureza do núcleo. Os processos de nitretação e envelhecimento melhoraram a vida de fadiga das amostras em mais de 40%.

Vitoli et al. (2015) [101] estudaram os comportamentos do aço 17-4 PH sob dois métodos de nitretação a plasma: Plasma-DC e Tela Ativa. Ambos os métodos foram capazes de promover a formação da camada nitretada de elevada dureza superficial, cerca de 1300 HVHV_{0,025}. Ainda, foi observado que no processo Plasma-DC a camada nitretada é composta, além da martensita acicular saturada em Nitrogênio, por nitretos de Ferro e Cromo. Enquanto que no processo de Tela Ativa, não há a precipitação de nitretos de Cromo, tendo apenas formado nitretos de Ferro. A explicação para essa ocorrência, deve-se pela diferença de oferta de nitrogênio entre os processos: na nitretação por Plasma-DC, houve uma oferta de nitrogênio suficiente para a precipitação do nitreto de cromo, diferentemente da nitretação em Tela Ativa. Consequentemente, o processo Plasma-DC apresenta uma maior profundidade de camada e de endurecimento transversal, devido a maior presença do Nitrogênio difundido no material.

A Figura 13 ilustra as etapas do processo de nitretação a plasma.

Figura 13 – Etapas do processo de nitretação a plasma.



a) Início com as peças preparadas catodicamente.



b) Fechamento da câmara do reator.



c) Início da ionização e limpeza das peças gerando o efeito luminoso.



d) Íons bombardeando a superfície das peças criando uma região brilhante.



e) Peças nitretadas.



f) Peças nitretadas (zoom).

Fonte: Ionitech (2022) [102].

Nitretação Gasosa

A nitretação gasosa pode ser realizada a baixas ou em altas temperaturas.

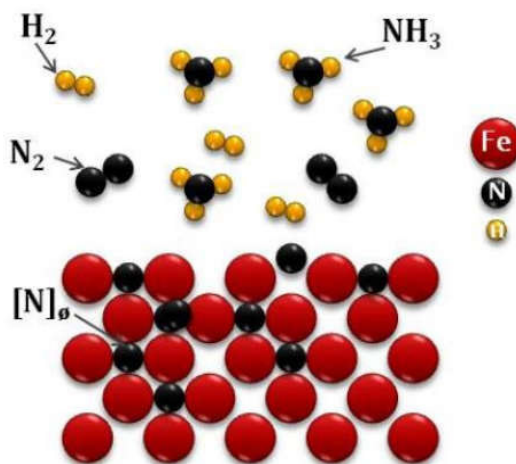
A nitretação a gás a baixa temperatura foi patenteada em 1913 e 1921. Geralmente é realizada na faixa dos 550 a 580 °C, em um forno ou um leito fluidizado contendo uma atmosfera preenchida parcialmente com amônia dissociada [88,103]. As vantagens desse processo são a rápida taxa de aquecimento e a uniformidade da temperatura quase ideal do volume das partículas de gás [88,104].

Por outro lado, o processo de nitretação gasosa em altas temperaturas foi utilizado pela primeira vez por Turkdogan na década de 50 [105]. Essa tecnologia aplicada para a produção de ligas ferrosas com microestrutura austenítica, foi patenteada por Hartline em 1976 [106]. Usualmente ocorre na faixa dos 1000 a 1200 °C, consiste do enriquecimento superficial do teor de nitrogênio dos aços inoxidáveis convencionais (austenítico, martensíticos, ferrítico-austeníticos e martensítico-ferríticos) por meio de uma atmosfera gasosa rica em N_2 . Essa metodologia permite dissolver, de forma intersticial, altos teores de nitrogênio no campo austenítico, da ordem de 0,5 a 1,0% de massa, diferentemente do processo convencional feito a baixas temperaturas, no qual há uma precipitação de nitretos de cromo que podem afetar negativamente a resistência à corrosão do aço [107].

A reação fundamental para a nitretação gasosa, ilustrada pela Figura 14, é a decomposição catalítica da amônia (NH_3) em hidrogênio (H_2) e nitrogênio (N), dada por:



Figura 14 – Química do processo de nitretação gasosa.



Fonte: Adaptado de Duong Nam et al. (2019) [108].

Com relação aos parâmetros, deve-se controlar a temperatura, o tempo e a taxa de dissociação do gás. Esse último, em muitos processos convencionais, por ser medido e ajustado periodicamente, faz com que a concentração superficial de nitrogênio não seja precisa, carecendo a previsibilidade da tecnologia do processo [88].

Para solucionar esse problema, deve-se controlar a quantidade de gás que entra em cada estágio. Ao invés da nitretação ser controlada pela taxa de dissociação, que é o caso da nitretação a gás convencional, ela será ajustada por um parâmetro denominado potencial de nitretação da atmosfera do forno [88,108], representado por:

$$K_n = \frac{pNH_3}{\sqrt{(pH_2)^3}} \quad (2)$$

onde pNH_3 é a pressão parcial da amônia e pH_2 é a pressão parcial do hidrogênio.

Duong et al. (2019) [108], após estudarem sobre a tecnologia de nitretação e métodos para controlarem a permeabilidade, chegaram à conclusão de que sensores de hidrogênio podem ser utilizados para monitorar e controlar a

quantidade de gás nitrogênio, a qualquer temperatura, aumentando assim, a confiabilidade, qualidade e repetitividade do processo.

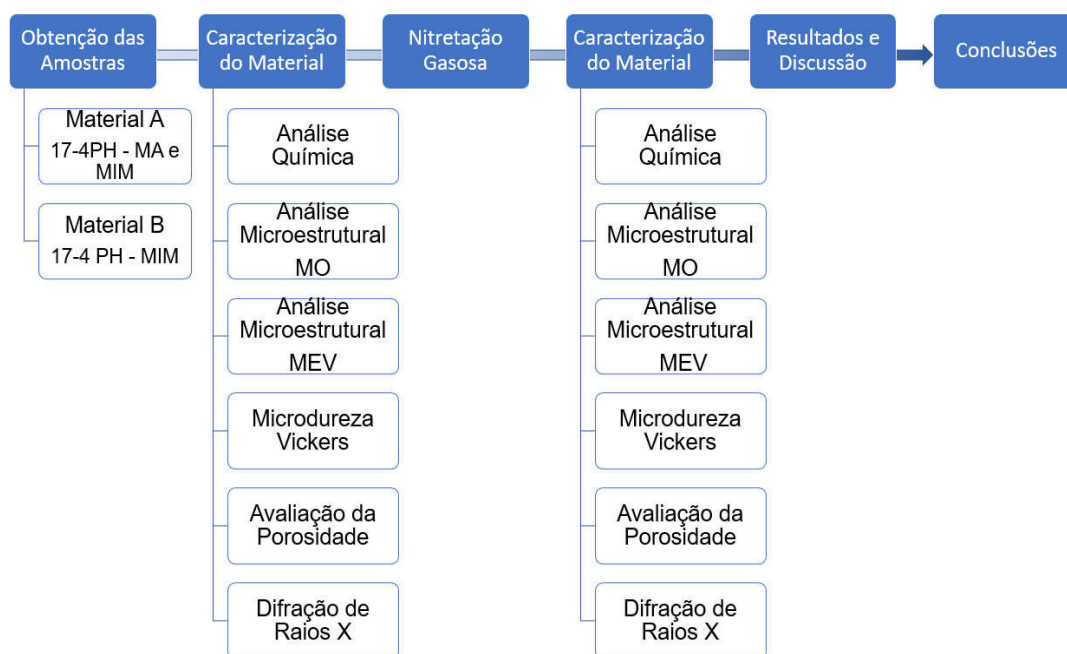
Hussain et al. (2020) [109] avaliaram a microestrutura e a microdureza de um aço inoxidável AISI 316L após sofrerem um processo de nitretação gasosa em alta temperatura, a 1200 °C, utilizando 50% de gás amônia e 50 % de gás nitrogênio por diferentes durações de 8, 15 e 20 horas. A amostra submetida ao processo de nitretação por 20 horas representou a maior dureza encontrada, 245,1 HV, valor esse que é 70% superior ao metal base. Não houve diferenças significativas com relação a microestrutura da amostra antes e após a nitretação.

Bottoli et al. (2018) [110] submeteram o aço 316 a dois processos de nitretação gasosa distintos. O primeiro a uma baixa temperatura (*LTN – Low Temperature Nitriding*), e o segundo a uma alta (*HTSN – High Temperature Solution Nitriding*). Primeiramente, as amostras foram recozidas a 1050 °C por 300 segundos em um forno tubular horizontal com uma atmosfera protetora de argônio de alta pureza. Tal procedimento objetivou-se a realizar o alívio de tensões e principalmente eliminar os efeitos de tratamentos térmicos anteriores. O procedimento LTN ocorreu em um forno de recozimento LAC modelo PKRC 55/09 adaptado para nitretação gasosa sob circulação de gás, a uma temperatura de 420°C por 20 horas. Já o HTSN foi utilizado sob o processo comercial da *Expanite A/S* [111], e ocorreu a 1150 °C por 12 horas, tendo sido pressurizado por três pressões parciais, tendo cada uma durado por 4 horas. As pressões foram de 0.3 bar, 0.6 bar e 0.9 bar, nesta sequência. O tratamento HTSN permitiu um aumento do conteúdo em massa do teor de nitrogênio, o que contribui para uma melhoria da resistência por pite com relação com o não tratado. Já o tratamento LTN gera uma camada rica em nitrogênio na superfície do material sem a ocorrência da formação de precipitados de nitretos de cromo (CrN). O nitrogênio dissolvido durante o processo LTN foi consideravelmente superior do que o HTSN, permitindo nos aços investigados, uma grande melhoria da resistência à corrosão localizada. Ainda, o LTN apresentou uma redução dramática da perda de peso em comparação com os materiais não nitretados e com o HTSN.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento adotado para esta pesquisa está esquematizado pelo fluxograma apresentado pela Figura 15.

Figura 15 – Fluxograma da metodologia adotada para a elaboração do trabalho.



Fonte: Autoria própria.

5.1 OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras utilizadas para o presente trabalho são oriundas de dois diferentes tipos de fabricação mecânica, os quais neste trabalho serão referenciados como Material A e B. Assim teremos: **Material A** – aço 17-4 PH impresso tridimensionalmente por MA e integrado a tecnologia MIM e o **Material B** – aço 17-4 PH produzido somente pela tecnologia MIM.

5.1.1 MATERIAL A - AÇO 17-4 PH OBTIDO POR TECNOLOGIAS MA E MIM

Para a confecção das peças verdes, foi utilizada a impressora MA que emprega a tecnologia FFF/FDM para a impressão 3D. O filamento utilizado para alimentar a impressora foi o *Ultrafuse 17-4 PH*, tendo este uma quantidade superior a 90% de metal em sua composição.

Os parâmetros de impressão foram os recomendados pela fabricante do filamento, BASF [82]: 235°C a temperatura de extrusão, 90°C a temperatura da plataforma de construção, 0.4 mm o diâmetro do bico, 30 mm/s a velocidade de impressão e a altura da camada impressa variando de 0,15 a 0,20 mm.

Posteriormente ao processo de impressão da peça verde, a peça sofreu dois tipos de *debinding* para a extração dos aglutinantes: químico com o uso das soluções de ácido nítrico 99,999% e térmico a 120 °C. O processo de sinterização é composto pelo ciclo: com uma taxa de 5°C/min, aquecer o forno até 600°C; quando chegar nesse limite, manter a temperatura por durante uma hora; utilizando a mesma taxa de aquecimento, injetar calor até o forno atingir 1300°C; permanecer por 3 horas e depois realizar deixar a peça resfriar dentro do forno.

5.1.2 MATERIAL B - AÇO 17-4 PH OBTIDO POR TECNOLOGIA MIM

Aço Inoxidável Endurecido por Precipitação 17-4PH obtido pela tecnologia MIM. O *feedstock* foi composto por 70% vol. de pó metálico do tipo 17-4 PH e 30% de aglutinante do tipo poliacetal. O *feedstock* após ser misturado comporá a mistura injetável a ser depositada no molde contendo o formato da amostra final. Após o desmolde, para a extração dos ligantes, a peça recebeu os processos de *debinding* químico em uma solução de ácido nítrico 99,999% e um *debinding* térmico a uma temperatura de 120°C. Por fim, a sinterização da peça marrom, objetivando a melhoria das suas propriedades mecânicas, ocorreu aos 1380 °C.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Foram realizadas, para a caracterização de todos os materiais obtidos, as seguintes análises: análise química; avaliação da microdureza *Vickers*; análise por

Microscopia Óptica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV); análise do volume de porosidade e Difração de Raios X (DRX).

5.2.1 ANÁLISE QUÍMICA

A análise química do material foi obtida mediante a realização de uma espectrometria de emissão óptica com o equipamento *Foundry-Master Pro*, da marca *Oxford Instruments*. Foram efetuadas, para cada amostra, medições em três pontos diferentes e o resultado apresentado trata-se da média.

Temos duas formas de calcular o carbono equivalente: a Eq. (3), criada na década de 40 pela *American Welding Society (AWS)* [112], indicada para os aços convencionais e, portanto, com o teor de carbono é superior a 0,12%; por outro lado, temos a Eq.(4), criada na década de 60 no Japão por e Ito-Bessyo [113], indicada para os aços alta liga com um teor de carbono inferior a 0,12 %.

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (3)$$

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (4)$$

5.2.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

As análises microestruturais foram obtidas por microscópio óptico e por MEV, com aumentos de 1000 vezes.

Análise Microestrutural por Microscópio Óptico

Para cada amostra, retirou-se um pequeno exemplar e então, realizou-se o seu embutimento a quente, de forma que a seção transversal do aço pudesse ser analisada. Na sequência, foi efetuado o procedimento de lixamento dos aços com lixas de granulometria de 80, 120, 200, 300, 400, 500, 600, 1000, 1200, 1500, 2000, 2500 grãos/cm², procedimento esse que prepara a amostra para a etapa de

polimento. Foi utilizado o abrasivo alumina para polir a superfície do material, e posteriormente, a mesma foi atacada com o reagente de villela. Após tais processos, as microestruturas das amostras foram observadas pelo microscópio óptico *Olympus GX 51S*, esse que possui um fator de ampliação da imagem original em até 1000 vezes.

Análise Microestrutural por MEV

Um microscópio óptico convencional, consegue um aumento máximo, aproximadamente, de 2000 vezes. Tal limitação impossibilita a visualização de pequenos detalhes estruturais. Assim, o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), o qual dependendo do material permite alcançar aumentos de até 900.000 vezes, é uma ótima solução para a observação dos fenômenos que ocorrem na escala micrométrica ou submicrométrica dos materiais [115].

O MEV irá irradiar sobre a superfície do material a ser analisado, um fino feixe de elétrons. Dessa interação, uma série de radiações são emitidas (pela superfície do material) tais como: elétrons secundários, elétrons retroespalhados, raios-X característicos, elétrons Auger, fótons, etc. A correta captação dessas radiações irá fornecer características sobre a amostra, tais como topografia da superfície, composição, cristalografia, dentre outros [115].

Atualmente, a maioria dos MEV vem equipados com Espectroscopia de Raios X (*EDS - Energy Dispersive Spectroscopy*), que captam e analisam os raios-X característicos emitidos pela amostra, fornecendo informações qualitativas e quantitativas da composição da amostra do material na região submicrométrica de incidência do feixe de elétrons. Já para a formação das imagens, os sinais de maior interesse são os elétrons secundários (*SEI - Secondary Electron Induced*) e os retroespalhados (*BSE - Backscattering Electrons*) [115].

A preparação da amostra para análise com o MEV seguiu o mesmo procedimento de lixa, polimento e ataque químico realizados para a caracterização inicial. Utilizou-se o equipamento MEV da marca Jeol, modelo *JSM-6610LV*. Para aquecer e emitir o feixe de elétrons, foi utilizada uma voltagem de 15 kV.

5.2.3 AVALIAÇÃO DA MICRODUREZA VICKERS

A determinação da microdureza *Vickers* de cada amostra, foi realizada conforme a norma ASTM E384-17 [114], a qual orienta sobre a carga a ser utilizada e o método de análise para eliminação de eventuais erros de medida.

Foi utilizado o microdurômetro modelo *HMV-2 séries*, da marca *Shimadzu*. Para cada tipo de material, foram realizadas 10 marcações antes e após o processo de nitretação. O resultado será a média dessas 10 marcações. O ensaio foi realizado mediante a aplicação de uma carga de 0,3 Kg durante um intervalo de 10 segundos.

5.2.4 AVALIAÇÃO DA POROSIDADE

As avaliações de porosidade das amostras foram realizadas com o auxílio do *software Image J, versão 1.8.0_172*.

Para o cálculo da porosidade utilizando o *Image J* serão necessários os seguintes procedimentos, os quais foram divididos em 6 passos, sendo eles:

1. Abrir a imagem a ser analisada dentro do programa (comandos: *File* → *open*);
2. Definir a escala da imagem a ser analisada. Isso é possível após traçar uma reta sobre a escala já definida no desenho e atribuir valores para os campos '*know distance*' e '*unit of lenght*' (comandos: *Analyze* → *Set Scale* → campos "*Know distance*" e "*Unit of lenght*"). OBS.: 'um' = μm ;
3. Transformar a imagem em 8 bits (comandos: *Image* → *Type* → *8-bit*);
4. A imagem deverá ser transformada em binário, assim o material será representado pela cor branca enquanto que a sua ausência, ou seja, a região porosa terá a coloração preta (comandos: *Process* → *Binary* → *Make Binary*);
5. O programa calculará a área preta. Logo, deve-se transformar os poros em preto (comandos: *Process* → *Binary* → *Convert to Mask*);
6. Filtrar a área a ser medida (comandos: *Rectangle* (selecionar a área a ser medida) → *Image* → *Crop*);

7. Quantificar a área porosa (comandos: *Analyze* → *Analyze particles* → *Show* → *Count Masks* (recomendado deixar marcadas as opções: *Display results*; *Clear results*; *Summarize*; *Record starts*).

5.2.5 ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X

O polimorfismo é um fenômeno no qual um sólido (metálico ou não metálico), sob determinadas condições de temperatura e de pressão, pode apresentar mais de uma estrutura cristalina, como é o caso da sílica SiO_2 que pode se apresentar em três formas diferentes: quartzo, cristobalita, ou ainda tridimita [116-117]. Assim, fica evidenciado que em alguns casos, além de saber a composição química, é necessário conhecer qual a estrutura cristalina do material, para então saber a sua forma.

A Difração de Raios X (DRX), permite identificar a estrutura cristalina do material. Sendo assim, ao utilizar essa técnica foi possível descobrir a configuração dos elementos químicos presentes nas amostras, com a finalidade de verificar se há presença de austenita expandida, martensita expandida, nitretos de ferro dos tipos Fe_23N (ϵ) e $Fe4N$ (γ'), ou ainda, alguns outros nitretos ou carbonetos.

5.3 NITRETAÇÃO GASOSA

Com a finalidade de aumentar a dureza superficial, mantendo a tenacidade do núcleo das amostras, essas foram submetidas ao processo de nitretação gasosa. O processo de nitretação ocorreu com aquecimento elétrico, em um forno do tipo poço, contendo uma atmosfera preenchida parcialmente com amônia dissociada a uma temperatura de 525 °C por 96 horas. O forno possui o controle da vazão de gás amônia (NH_3), essa que ao ser craqueada resultará na liberação do gás nitrogênio (N_2) para a difusão no substrato.

5.4 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS NITRETADAS

Foi realizada uma nova caracterização das amostras nitretadas, no qual foram feitos, novamente, ensaios de análise química; avaliação da microdureza *Vickers*, incluindo o perfil de microdureza na camada branca da região nitretada); análise de microestrutura óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV); análise do volume de porosidade e difração de raios X.

6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados da caracterização dos materiais A e B, antes e após o processo de nitretação gasosa.

6.1 ANÁLISE QUÍMICA

A Tabela 5 revela a composição química encontrada para cada um dos materiais 17-4 PH utilizados. Note que foram calculados os valores de carbono equivalente utilizando a equação criada para os aços convencionais (CEQ) [112] e também para àquela criada para aços alta liga que contém um baixo teor de carbono (P_{cm}) [114], por meio das equações Eq. (3) e Eq. (4), respectivamente.

A composição química encontrada está dentro daquela que se refere ao aço 17- 4 PH, sendo de 15% a 17,5% de Cr; 3,0 a 5,0% de Ni; 3,0 a 5,0 % de Cu; até 0,07 % de C e ainda tendo para os seus elementos residuais os limites máximos de 1,0 % de Mn; 1,0 de Si %; 0,04% de P e 0,03% de S [81].

Tabela 5 – Composição química dos dois materiais 17-4 PH utilizados, A e B.

	Elementos Químicos									
Materiais	Cr (%)	Ni (%)	Cu (%)	Mn (%)	Si (%)	C (%)	P (%)	S (%)	CEQ [112],	P_{cm} [113]
Composição 17-4 PH [81]	15,0 -17,5	3,0 - 5,0	3,0 - 5,0	1,0 (máx)	1,0 (máx)	0,07 (máx)	0,04 (máx)	0,03 (máx)	3,4(mín) - 4,5(máx)	0,95(mín) - 1,36(máx)
MATERIAL A (AM e MIM)	17,0	4,0	4,0	0,8	0,25	0,005	0,004	0,004	4,1	1,215
MATERIAL B (MIM)	16,0	4,0	4,0	0,7	0,25	0,005	0,004	0,004	3,9	1,16

Fonte: Autoria própria.

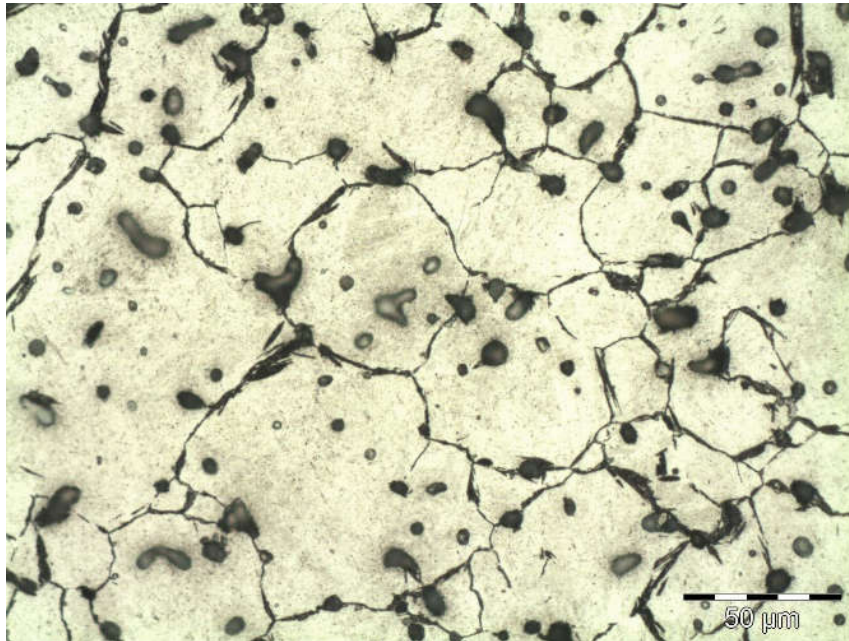
6.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

As apresentações e discussões dos resultados das análises microestruturais foram realizadas separadamente para cada tipo de material.

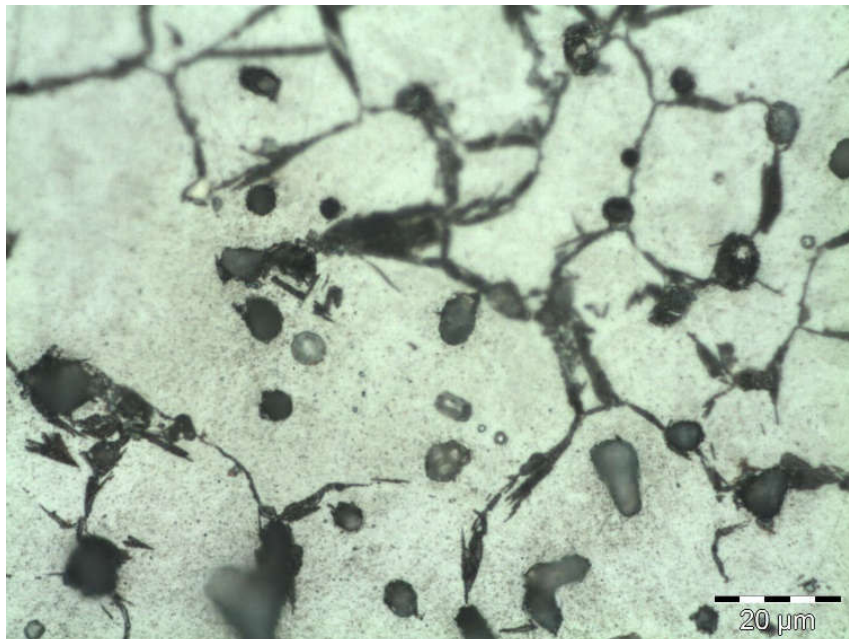
MATERIAL A - Aço 17-4 PH fabricado pelos processos MA & MIM

As Figuras 16 e 17 mostram, respectivamente, as micrografias obtidas do Material A, para o metal base e para a camada de nitretos [84,100, 101].

Figura 16 – Micrografia do metal base do Material A, obtida por MO.

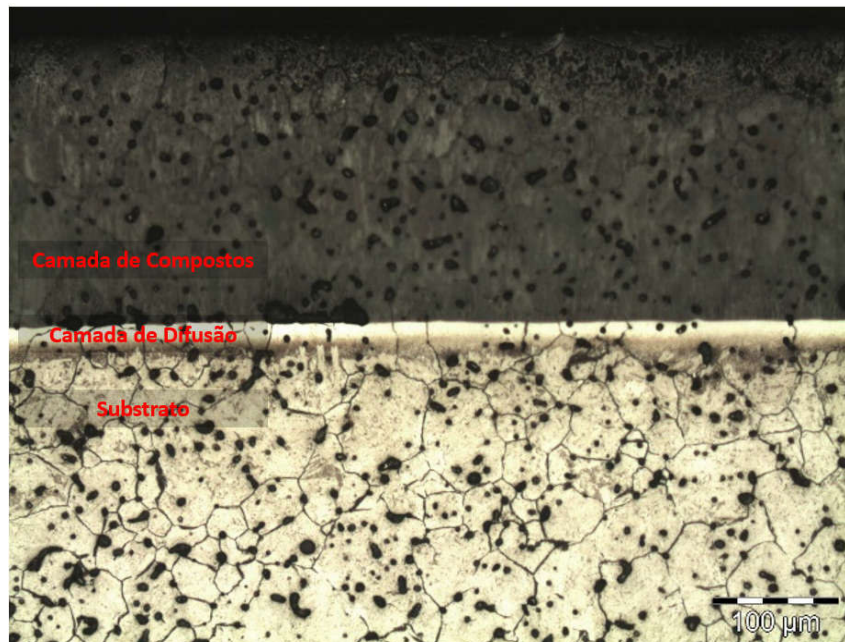


- a) Metal base do Material A – nota-se que o material é poroso e que a microestrutura predominante no aço é a martensítica.

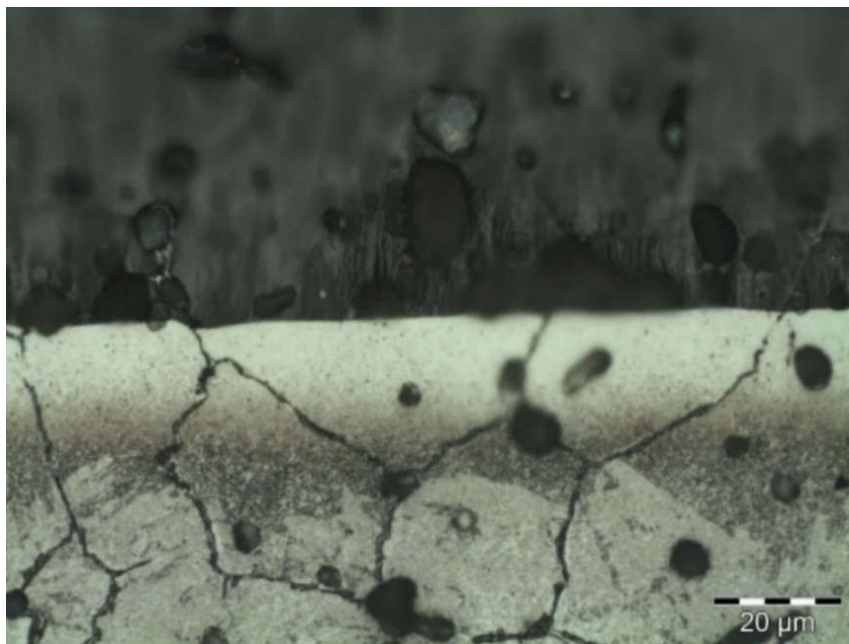


- b) Metal base do Material A – nota-se na micrografia que algumas linhas do contorno de grão não foram totalmente reveladas.

Figura 17 – Micrografia do Material A nitretado, obtida por microscópio.



- a) Material A nitretado – nota-se nessa imagem: a camada de compostos (representada na imagem pela coloração acinzentada); logo abaixo a camada de difusão; e por último, o substrato.



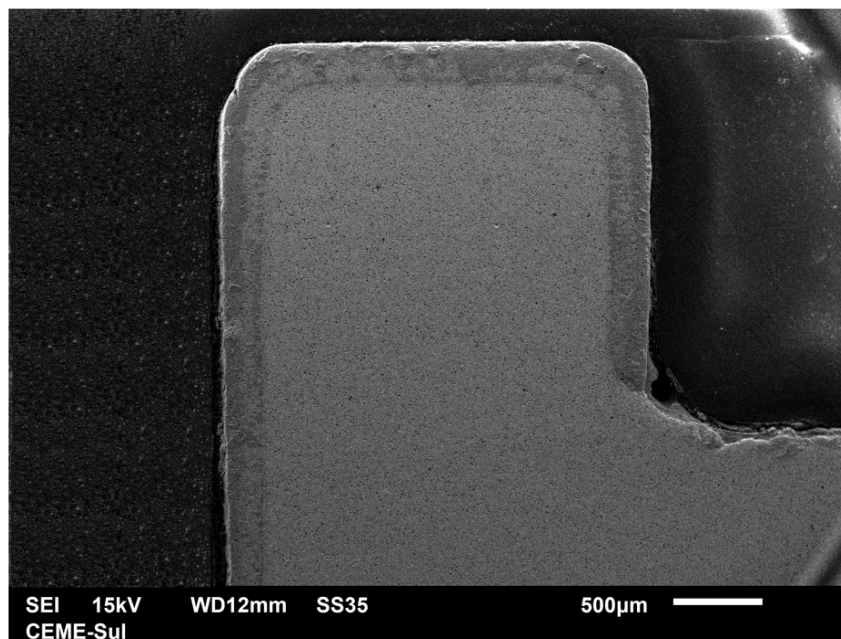
- b) Material A nitretado – nota-se a camada de difusão bem definida (região entre a camada de compostos e o substrato). Observa-se que nessa região há ausência da microestrutura martensítica.

A Figura 16 mostra a microestrutura martensítica do metal de base do Material A, aço 17-4 PH produzido pelos processos de MA e MIM [84]. O ataque químico foi realizado com o reagente *vilella* durante 70 segundos. É possível notar que algumas linhas dos contornos de grão do material não foram reveladas. Nas tentativas em que as amostras foram submetidas a um tempo maior para a revelação de todo o contorno de grão, o ataque químico acabou oxidando a peça e tornando assim, impossível a visualização da microestrutura do material. É possível notar também o grande volume de poros existente no material.

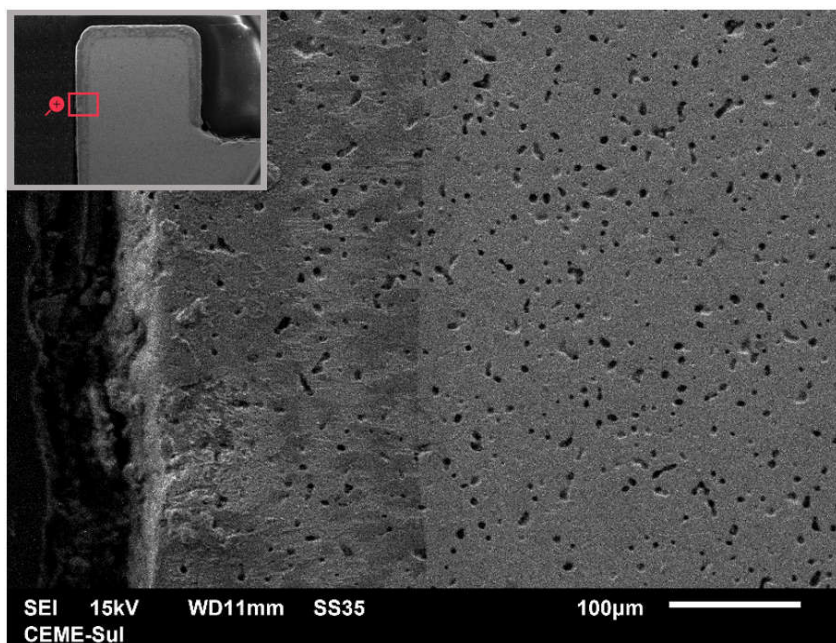
Já a Figura 17 além de mostrar a microestrutura martensítica, também revela a camada nitretada e a zona de transição do Material A nitretado [100,101]. A ausência do formato de agulhas no aço martensítico é devido ao longo processo de nitretação gasosa a 525 °C, que ocorreu por 96 horas. Para essa amostra, antes da realização do ataque químico com o reagente *vilella* para revelar a microestrutura martensítica do material, foi feito um ataque com o reagente *nital* a 3% para a revelação da camada nitretada. É justamente devido ao ataque de *vilella* que a camada de compostos e a zona de transição da Figura 17 apresenta tons escuros.

A Figura 18 a seguir mostra as micrografias do Material A nitretado obtido por MEV.

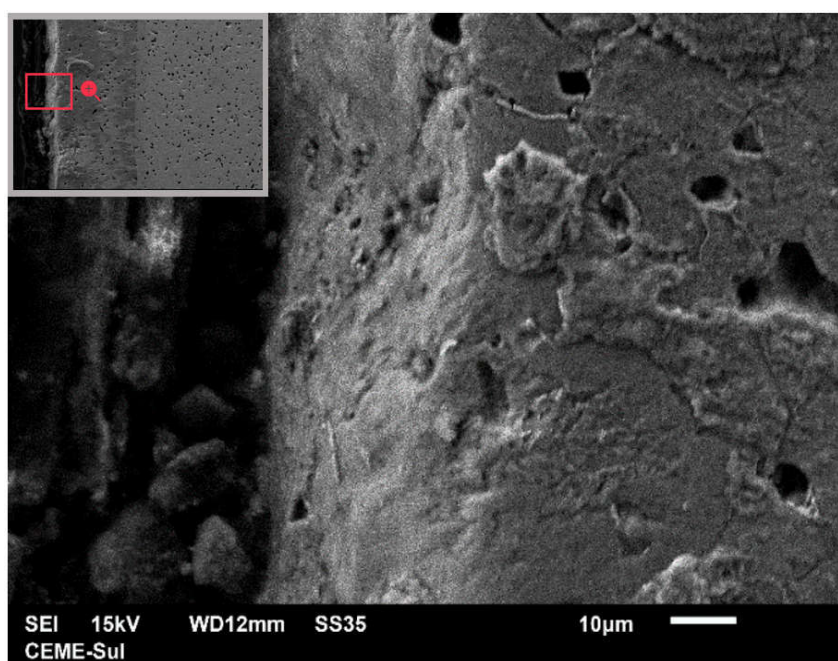
Figura 18 – Micrografia do Material A nitretado, obtida por MEV.



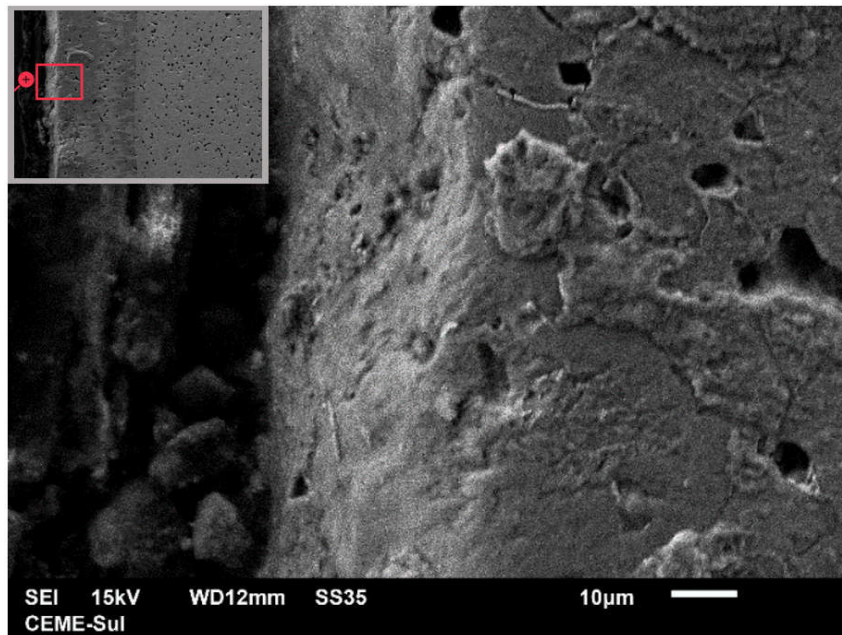
- a) Microestrutura do Material A obtida pelo MEV – nota-se a camada de compostos bem definida por todo o contorno do material.



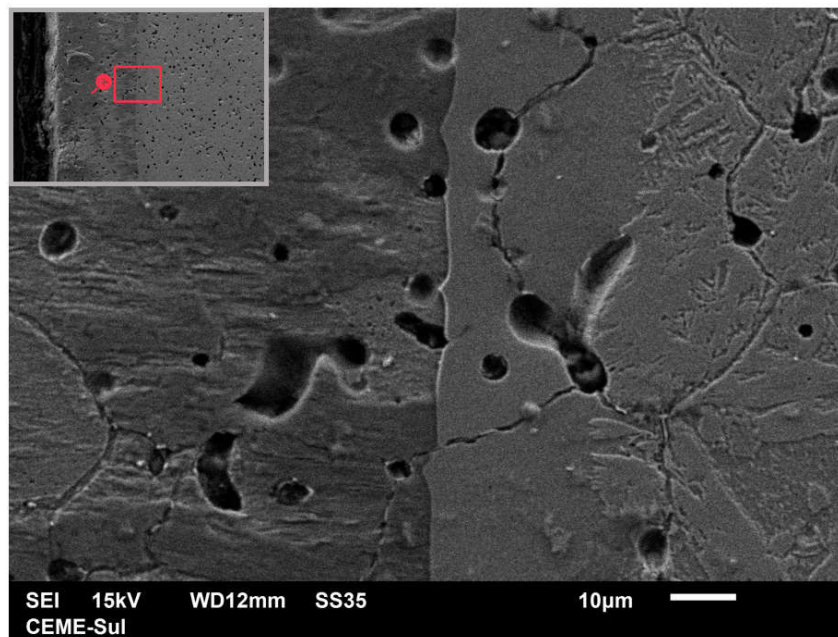
b) Microestrutura do Material A obtida pelo MEV – nota-se que a camada de compostos e o substrato do material são regiões bem definidas.



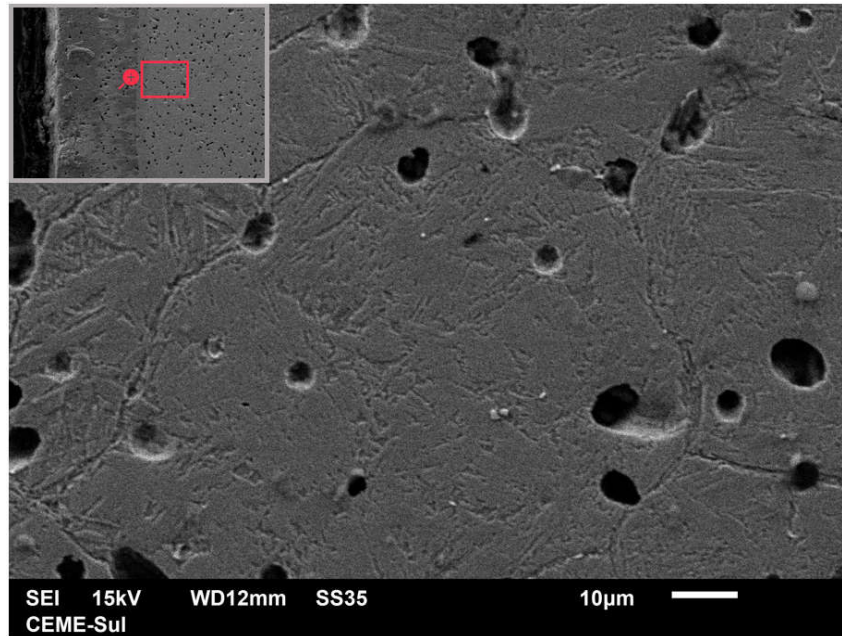
c) Microestrutura do Material A obtida pelo MEV – nota-se a transição entre a resina acrílica e o início da camada de compostos do Material A.



d) Microestrutura do Material A obtida pelo MEV – nota-se a camada de compostos do Material A.



e) Microestrutura do Material A obtida pelo MEV – nota-se a transição entre a camada de compostos e o substrato do material.



- f) Microestrutura do Material A obtida pelo MEV – nota-se o substrato e, portanto, o material base do aço fabricado por MA.

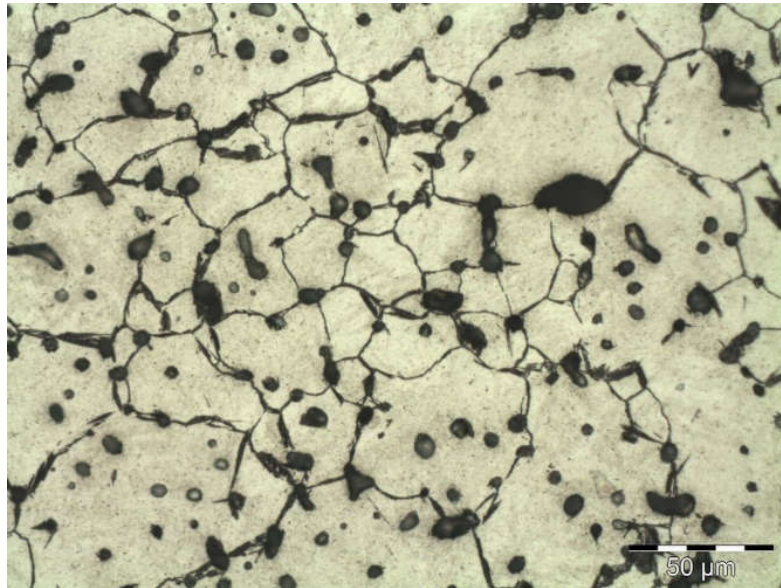
A Figura 18 mostra as microestruturas obtidas em várias áreas do Material A [100,101]. Na superfície do material (**Figuras c e d**) podemos observar a camada nitretada, essa que possui uma largura média de 0,206 mm. Logo depois é possível visualizar a zona de difusão (**Figura e**) que está entre a camada nitretada e o material base (**Figura f**), essa última que corresponde ao núcleo do material e, portanto, não é afetada pela exposição ao N_2 ocorrida no processo termoquímico de nitretação.

Podemos observar também (**Figuras a e b**) que a camada nitretada não é totalmente homogênea.

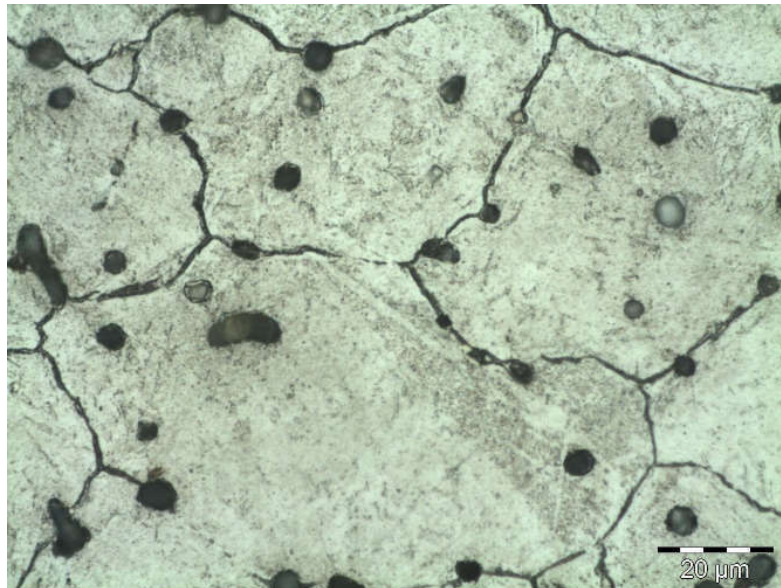
MATERIAL B - Aço 17-4 PH fabricado pelo processo MIM

As Figuras 19 e 20 e mostram, respectivamente, as micrografias obtidas do Material A, para o metal base e para a camada de nitretos [22,100, 101].

Figura 19 – Micrografia do metal base do Material B, obtida por microscópio.

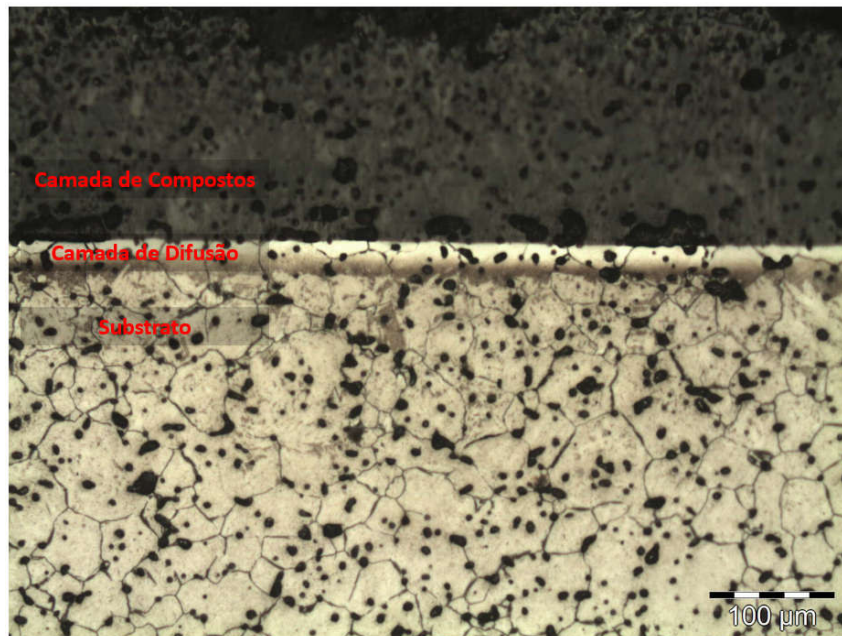


- a) Metal base do Material B – nota-se que, assim como o Material A, o material B também é poroso e a microestrutura predominante no aço é a martensítica.

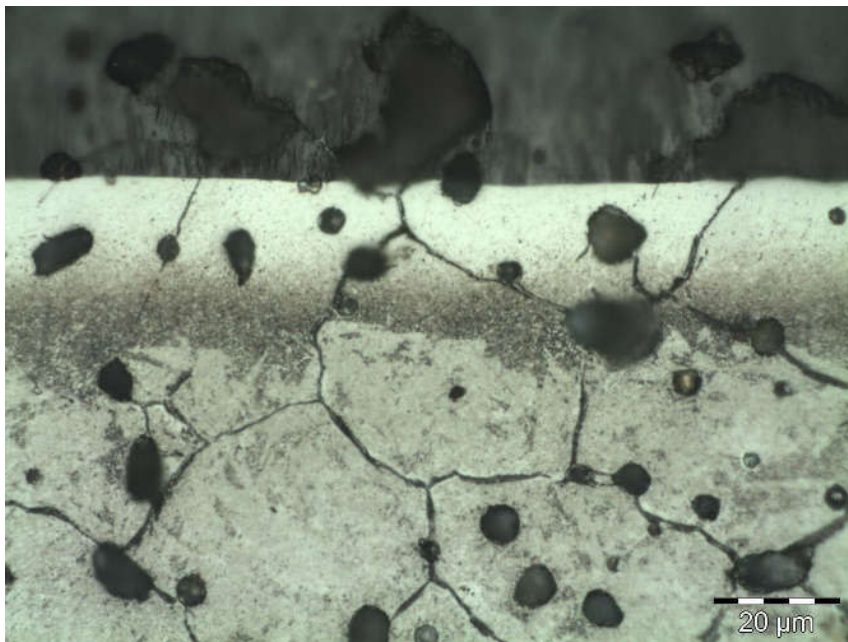


- b) Metal base do Material B – diferentemente do Material A, nota-se que as linhas dos contornos de grãos estão bem definidas. Curiosamente, o tempo de ataque com o reagente *nital* a 3% foi o mesmo para ambas amostras.

Figura 20 – Micrografia do Material B nitretado, obtida por microscópio.



- a) Material B nitretado – nota-se nessa imagem: a camada de compostos (representada na imagem pela coloração acinzentada); logo abaixo a camada de difusão; e por último, o substrato.



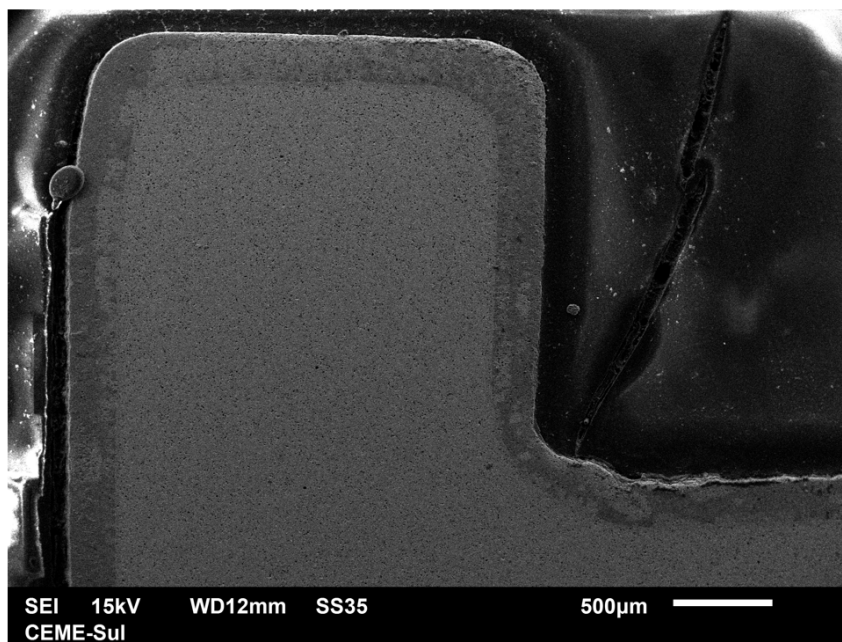
- b) Material A nitretado – nota-se a camada de difusão bem definida (região entre a camada de compostos e o substrato). Observa-se que nessa região há ausência da microestrutura martensítica.

A Figura 19 mostra a microestrutura martensítica do metal de base do Material B, aço 17-4 PH produzido somente pelo processo MIM [22]. O ataque químico aqui realizado foi o mesmo do Material A. As micrografias mostram os contornos de grão da estrutura martensítica e, também, um grande volume de poros. Diferentemente da Figura 16, o ataque químico de *vilella* que também ocorreu por 70 segundos foi capaz de revelar com clareza os contornos de grão do material. Aqui, também valem as mesmas considerações realizadas para o Material A, a ausência do formato de agulhas no aço martensítico deve-se ao processo de nitretação gasosa a 525 °C, que ocorreu por 96 horas e os tons escuros da camada branca e da zona de transição mostrados na micrografia das amostras (Figura 20), deve-se pelo contato do aço com o reagente *vilella*.

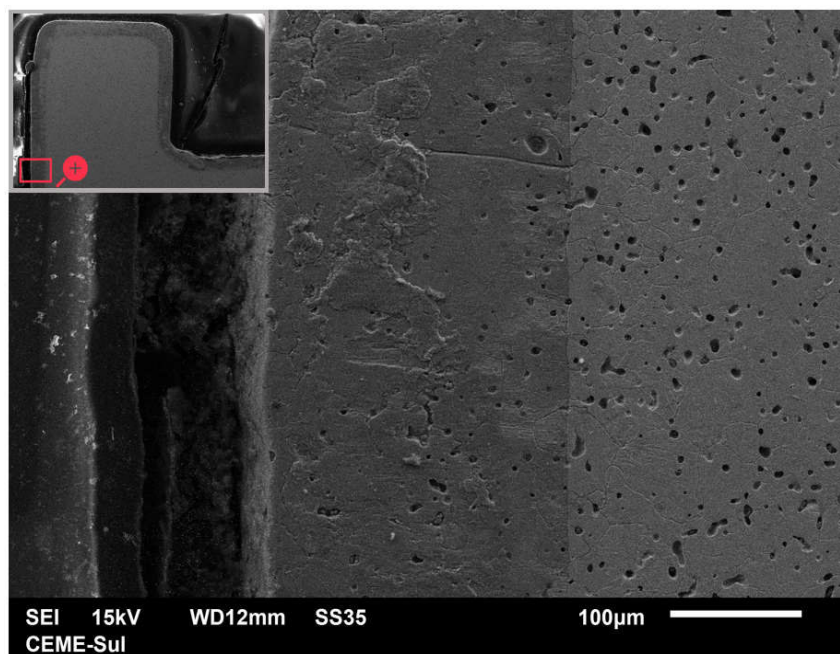
A Figura 20 mostra a camada nitretada, a zona de transição e o metal base do Material B [100, 101]. Antes de revelar a microestrutura com *vilella*, também foi realizado um ataque com o reagente *nital* a 3% para a revelação da camada nitretada.

A Figura 21 a seguir mostra as micrografias do Material B nitretado obtido por MEV.

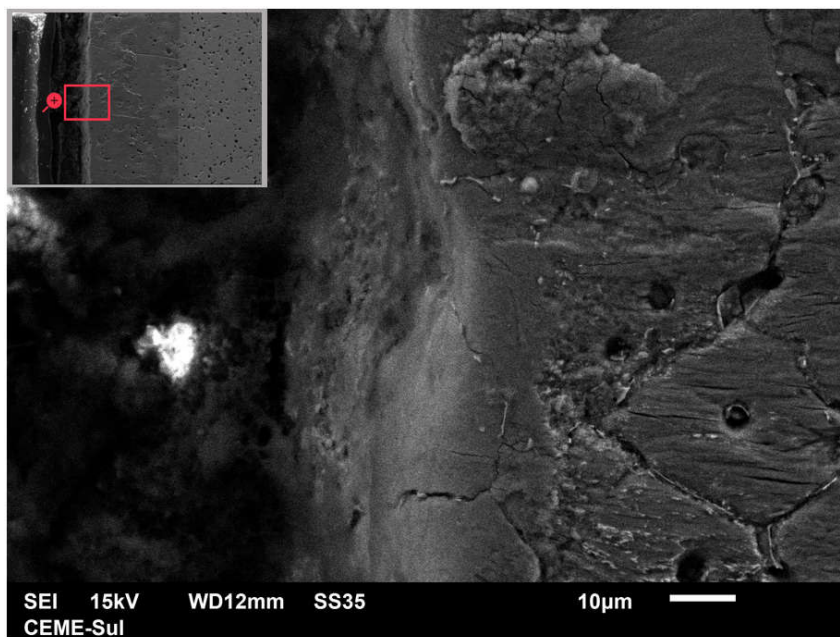
Figura 21 – Micrografia do Material B nitretado, obtida por MEV.



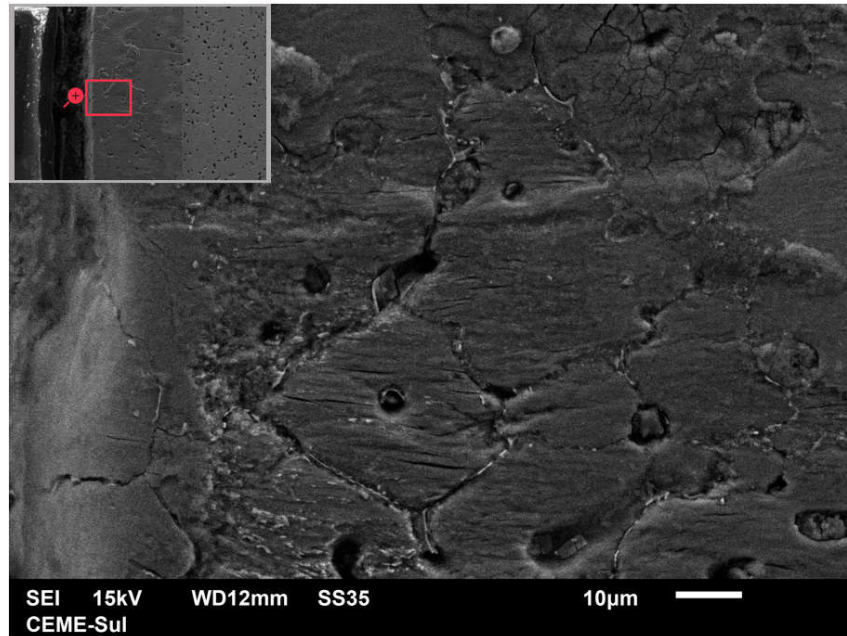
- a) Microestrutura do Material B obtida pelo MEV – nota-se a camada de compostos bem definida por todo o contorno do material.



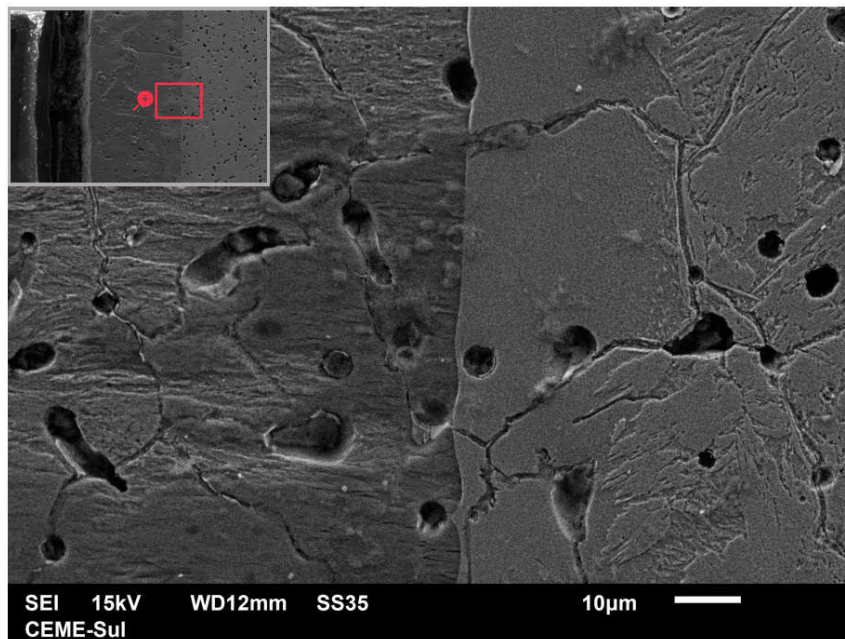
b) Microestrutura do Material B obtida pelo MEV – nota-se que a camada de compostos e o substrato do material são regiões bem definidas.



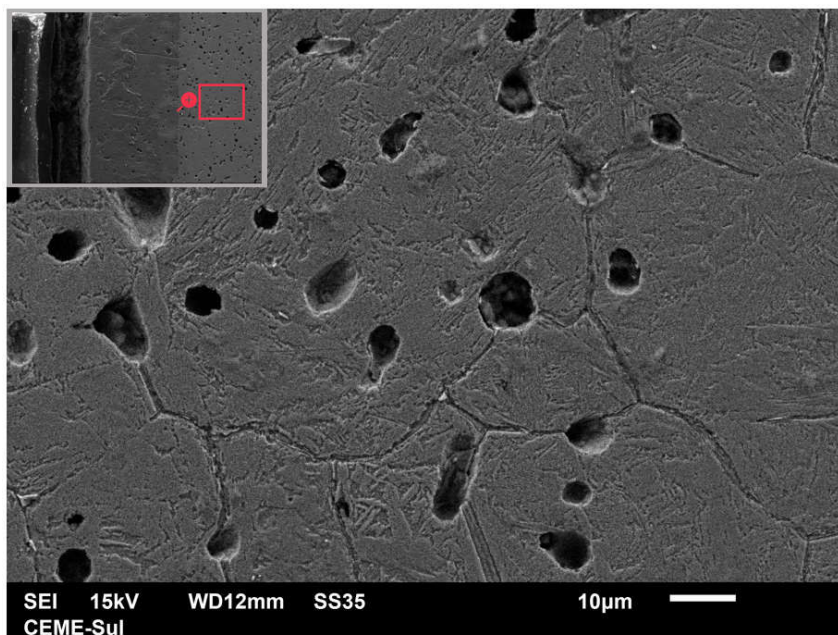
c) Microestrutura do Material B obtida pelo MEV – nota-se a transição entre a resina acrílica e o início da camada de compostos do Material B.



- d) Microestrutura do Material B obtida pelo MEV – nota-se a camada de compostos do material. A coloração branca na esquerda da imagem deve-se à reação química do feixe de elétrons do MEV com a resina acrílica do embutimento da amostra.



- e) Microestrutura do Material B obtida pelo MEV – nota-se a transição entre a camada de compostos e o substrato do material.



f) Microestrutura do Material B obtida pelo MEV – nota-se o substrato e, portanto, o material base do aço fabricado por MA.

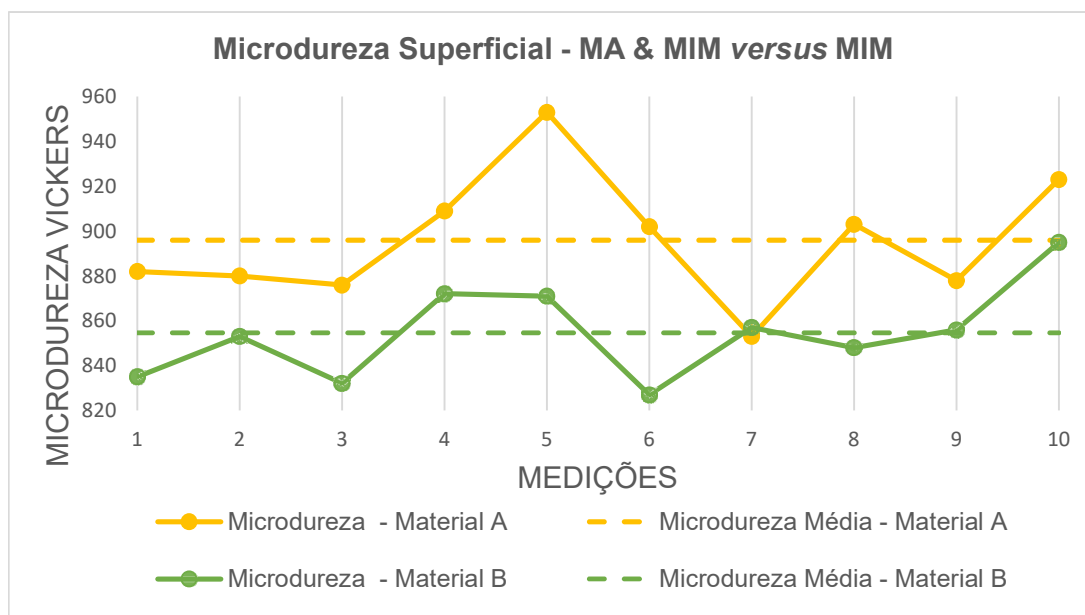
A Figura 21 mostra as microestruturas obtidas em várias áreas do Material B [100, 101]. Na superfície do material (**Figura d**) podemos observar a camada nitretada, essa que possui uma largura média de 0,230 mm e, portanto, é maior do que a obtida para o Material A (0,206mm). Logo depois é possível visualizar a zona de difusão (**Figura e**) que está entre a camada nitretada e o material base (**Figura f**), essa última que corresponde ao núcleo do material e, portanto, não é afetada pela exposição ao N_2 ocorrida no processo termoquímico de nitretação.

Podemos observar também (**Figuras a e b**) que a camada nitretada é mais homogênea do que àquela obtida no Material A (Figura 18).

6.3 MICRODUREZA VICKERS

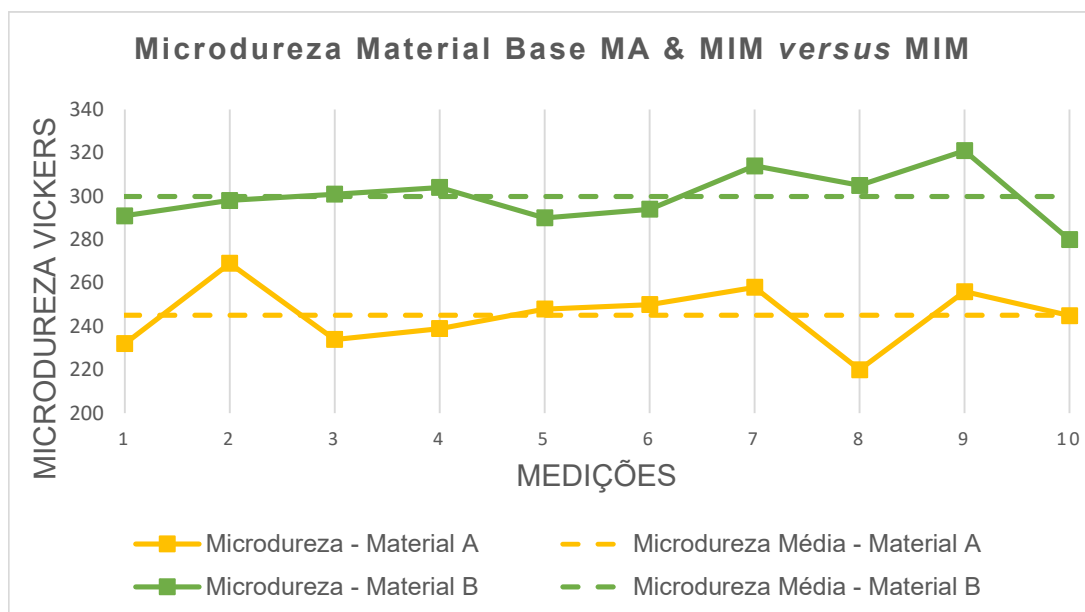
Com o propósito de quantificar a dureza média na camada nitretada e também no material base, os materiais A e B foram submetidos, cada um, a dez indentações na superfície do material nitretado e outras dez no material base. A Figura 22 traz os resultados dos ensaios realizados na superfície das amostras, enquanto a Figura 23 para os realizados no material base.

Figura 22 – Microdureza Vickers Superficial dos materiais A e B.



Fonte: Autoria própria.

Figura 23 – Microdureza Vickers Superficial dos materiais A e B.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 6 traz um resumo dos resultados encontrados, no qual é informada a média e o desvio padrão das microdurezas obtidas.

Tabela 6 – Ensaio de Microdureza Vickers para os materiais A e B, na camada nitretada e no material base.

ENSAIOS NA REGIÃO NITRETADA (SUPERFICIAL)		
	MATERIAL A	MATERIAL B
MICRODUREZA MÉDIA	895,9 HV _{0,3}	854,6 HV _{0,3}
DESVIO PADRÃO	26,94	19,78
ENSAIOS NO MATERIAL BASE		
	MATERIAL A	MATERIAL B
MICRODUREZA MÉDIA	245,1 HV _{0,3}	299,8 HV _{0,3}
DESVIO PADRÃO	13,06	11,40

Fonte: Autoria própria.

Como podemos observar, a nitretação gasosa resultou em aumentos médios de dureza superficial, quando comparados ao material base, da ordem de 365% e 285% nos materiais A e B, respectivamente.

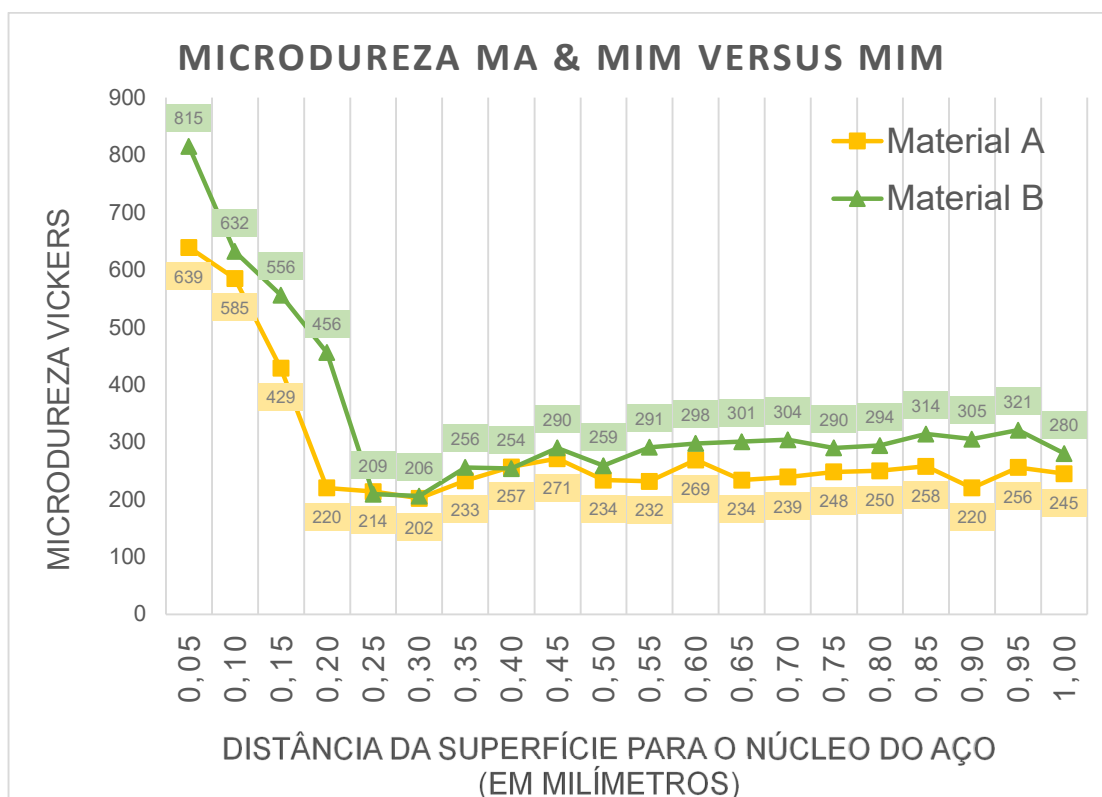
Se tratando do metal base 17-4 PH, a BASF encontrou utilizando o *Ultrafuse 17-4PH* [82], uma microdureza de 257 HV₁₀ nas suas amostras impressas. Singh et al. (2021) [84] também utilizando o método de impressão do tipo FFF encontraram 400 HV e Huber, D.; Vogel, L. e Fischer, A. (2021) [86] utilizando o método *3D Printing* conseguiram valores de 400HV.

Riazi et al. (2017) [100] avaliaram a dureza de amostras de 17-4 PH laminadas a quente e recozidas após serem submetidas, de forma simultânea, aos processos de nitretação a plasma e envelhecimento. Os resultados das durezas superficiais obtidas para as quatro condições ensaiadas foram: 862HV para uma nitretação a 400 °C por 5 horas, de 1053HV para 400°C e 10horas, de 1501HV para 450°C e 5 horas e de 1848HV para 500°C a 5 horas.

Vitoli et al. (2015) [101] estudaram os comportamentos do aço 17-4 PH sob dois métodos de nitretação a plasma: Plasma-DC e Tela Ativa. Ambos os métodos foram capazes de promover a formação da camada nitretada de elevada dureza superficial, cerca de 1300 HV_{0,025}.

Também foi realizado um perfil de microdureza para os materiais A e B. Através de um corte transversal nas amostras nitretadas, temos que a região externa corresponde-se a camada nitretada, enquanto que o núcleo do material corresponde-se ao metal base. Assim, foram realizadas 20 indentações, tendo a primeira sido ocorrida a uma distância de 0,05 mm da superfície do material, as posteriores foram realizadas com uma distância incremental de 0,05 mm da marcação anterior, chegando no último teste, esse que foi feito a uma distância de 1,00 mm da superfície do material. Com estas medições, foi plotado o perfil de microdureza representado pela Figura 24.

Figura 24 – Perfil de Microdureza Vickers para os materiais A e B.



Fonte: Autoria própria.

Como podemos visualizar pela Figura 24, os resultados de microdureza para o Material B foram maiores que os obtidos para o Material A. Esses resultados também mostram que a camada nitretada do Material B é maior que se comparada com a camada nitretada do Material A, uma vez que para a distância de 0,20 mm da superfície dos materiais, a microdureza do material B possui valores elevados e,

portanto, pertencente à camada nitretada, enquanto a medição do material A já se trata de valores de microdureza do material de base.

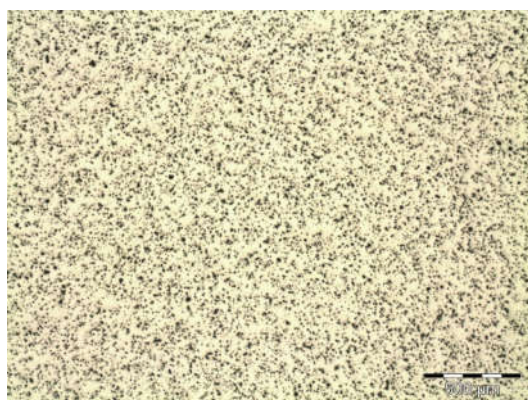
6.4 AVALIAÇÃO DA POROSIDADE

A Figura 25 mostra as micrografias do Material A sem a realização de nenhum ataque químico. As **Figuras b e d**, situadas do lado direito representam as mesmas micrografias das **Figuras a e c**, respectivamente, no entanto tratadas com o *software J*. Com essas imagens e o auxílio do software mencionado é possível estimar a porosidade do material. O software J irá converter as imagens em binário, ou seja, o que é material fica branco e o que é poro fica preto, sendo possível assim calcular a relação da área preta sobre a área branca, e estimando assim, a porosidade do material.

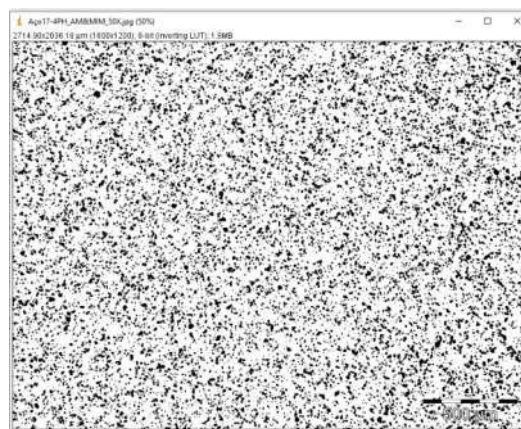
Para mensurar o volume de poros é recomendado o uso de uma micrografia que contenha a maior área possível do material já que essa será mais representativa. Dessa forma, o ideal seria uma micrografia extensa que contivesse toda a área do material a ser analisado.

As imagens analisadas possuem aumento de X vezes e 2X vezes (dobro de aumento da primeira imagem). O aumento de X vezes corresponde ao menor aumento fornecido pelo MO. Nessa análise, será mostrado que ao utilizar um aumento menor podemos cometer um “erro de aproximação” ao estimar a porosidade do material, devido a análise ser realizada em uma área menor e, portanto, não ser representativa.

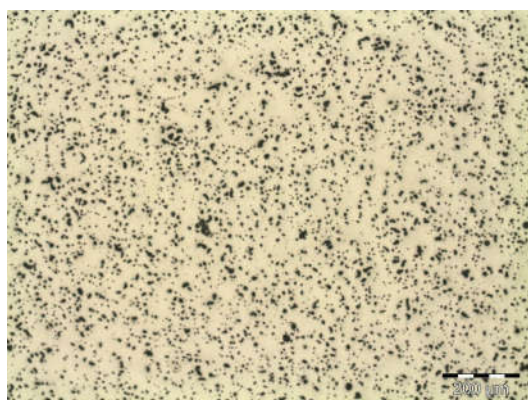
Figura 25 – Análise de porosidade do Material A



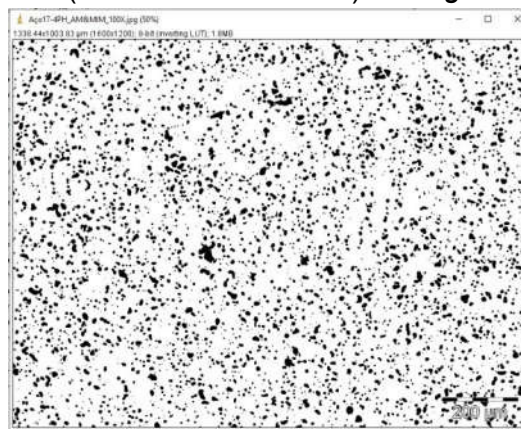
a) Micrografia do Material A
(aumento de X vezes).



b) Micrografia do Material A
(aumento de X vezes) – *Image J*



c) Micrografia do Material A
(aumento de 2X vezes).

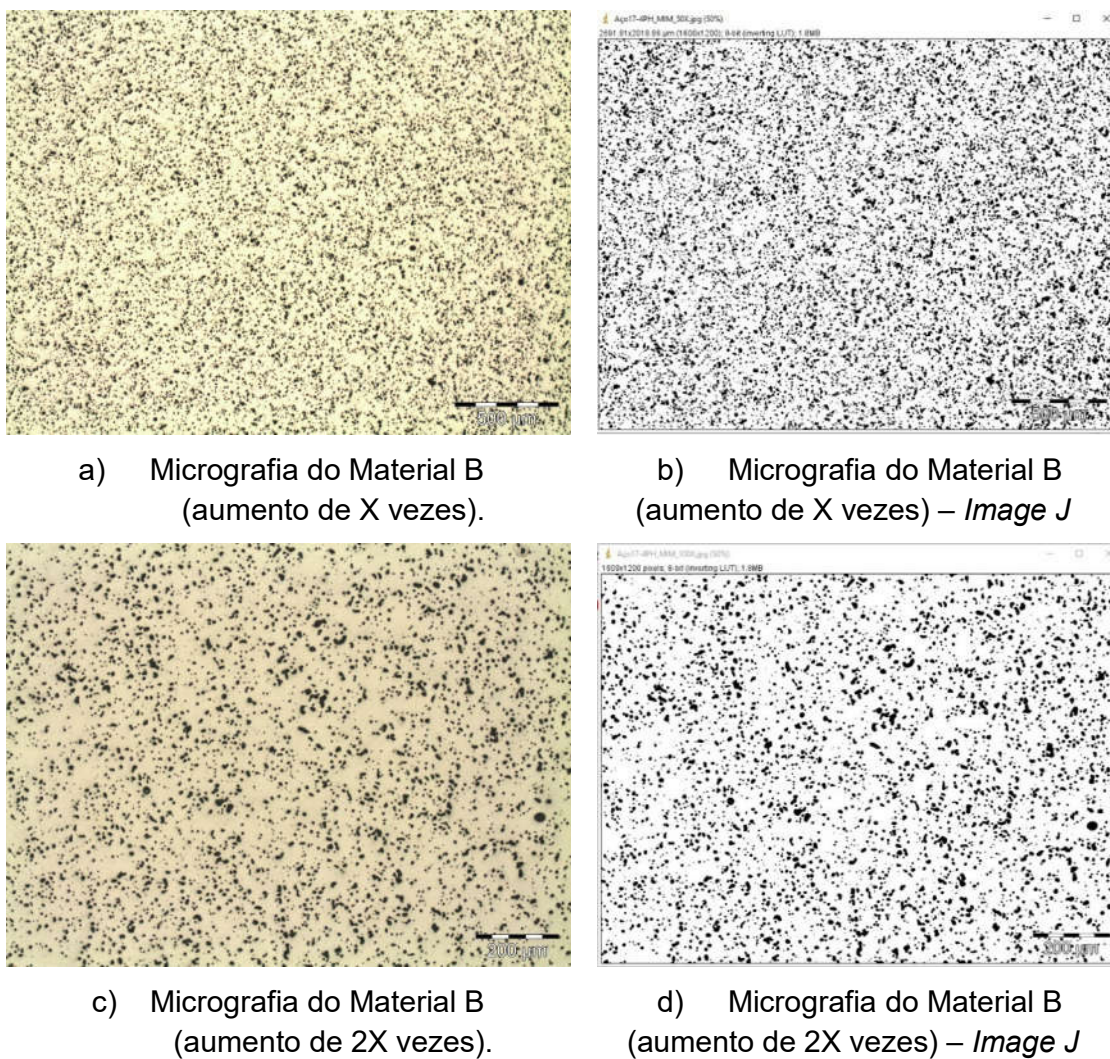


d) Micrografia do Material A
(aumento de 2X vezes) – *Image J*

Fonte: Autoria própria.

Utilizando o mesmo raciocínio, a Figura 26 mostra as imagens que foram utilizadas para estimar a porosidade do Material B.

Figura 26 – Análise de porosidade do Material B



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 7 fornece a porosidade encontrada para os materiais A e B, para seus dois aumentos ópticos analisados (50 e 100 vezes).

Tabela 7 – Porosidade dos materiais A e B.

Aumento Óptico	Porosidade %	
	Material A	Material B
X vezes	19,12 %	18,60%
2X vezes	13,62 %	13,20 %

Fonte: Autoria própria.

Por ambos os materiais terem sido submetidos ao processo MIM, estes são altamente porosos.

Para o Material A, fabricado por MA e MIM, as porosidades encontradas para os aumentos de X e 2X vezes foram de 19,12% e 13,62%, respectivamente. Já para o Material B, fabricado somente pela tecnologia MIM, foram obtidos os valores de 18,60% e 13,20%.

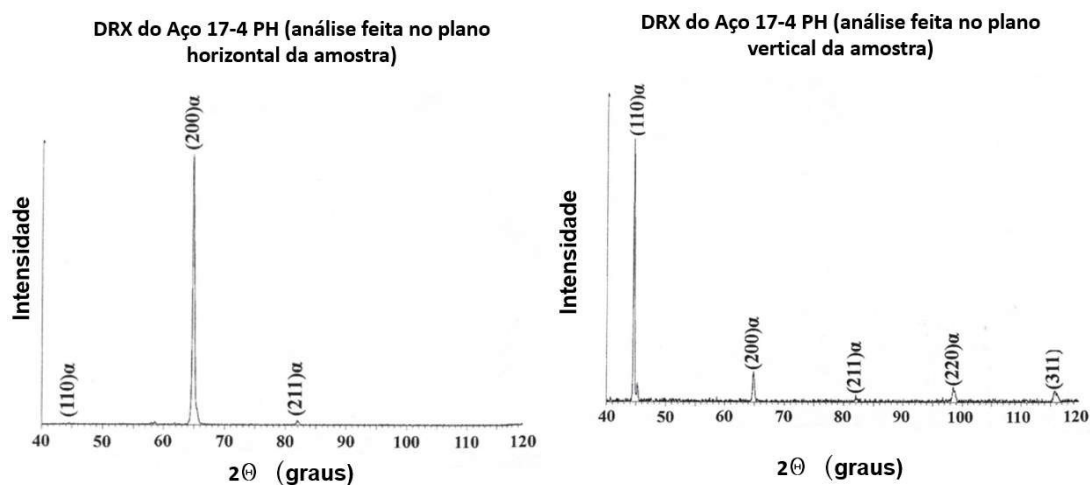
Os volumes de porosidade encontrados para os dois materiais são bem próximos. Note que, para a presente análise, ao utilizar uma micrografia com uma área menos representativa do material (aumento de X vezes) obtivemos uma porosidade em média 30% menor dos valores reais.

Singh et al. (2021) [84], utilizando o processo FFF com um filamento do tipo 17-4 PH, realizaram *debinding*: catalítico e químico e também, ensaiaram várias temperaturas para a sinterização. A menor porosidade encontrada, 4,4% foi obtida para a maior temperatura de sinterização ensaiada, 1360° C por 3 horas. Já as amostras de 17-4PH preparadas por Huber, Vogel e Fischer (2021) [86], foram produzidas pelo método Jateamento de Aglutinante 3DP (*3D Printing* – Impressão 3D) na qual uma solução aquosa foi seletivamente jateada nos póis metálicos. O *debinding* térmico foi efetuado em três etapas: 450 °C por 120 min, 600 °C por 150 min e 650 °C por 30 min. Também foram realizadas, em amostras distintas, diferentes etapas de sinterização, sendo encontrada uma porosidade inferior a 1,0% na amostra marrom submetida no forno com uma temperatura de 1300°C por 90 minutos.

6.5 ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A Figura 27 mostra resultados de ensaios de DRX obtidas para o aço 17-4 PH, tanto para análises realizadas no plano horizontal como no plano vertical.

Figura 27 – DRX do Aço 17-4 PH

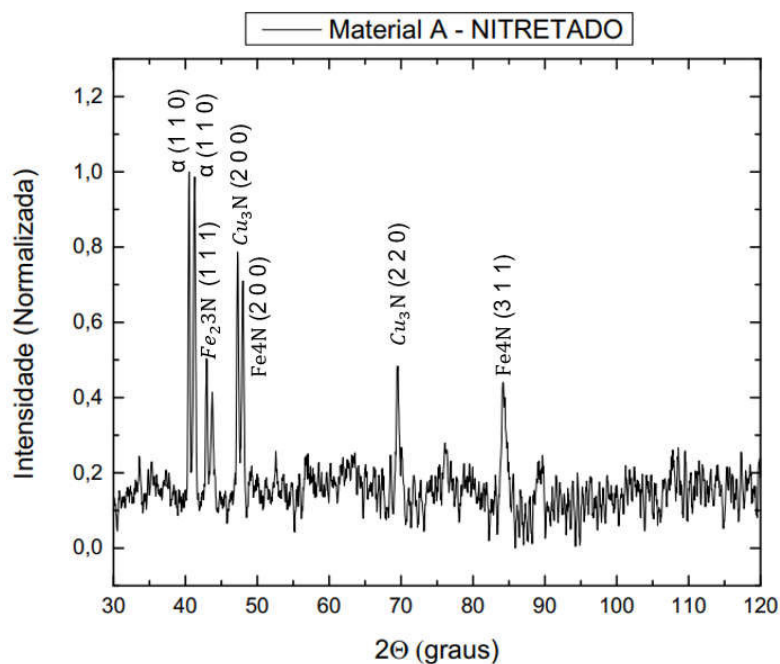


- a) DRX do aço 17-4 PH – plano horizontal.
- b) DRX do aço 17-4 PH – plano vertical.

Fonte: Adaptado de Murr et al. (2012) [85].

A Figura 28 mostra o difratograma obtido para o Material A nitretado.

Figura 28 – Análise DRX para o Material A Nitretado



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 8, abaixo, mostra a interpretação do ensaio de DRX realizado para o Material A nitretado.

Tabela 8 - Resultados do Difratoograma do Material A NITRETADO

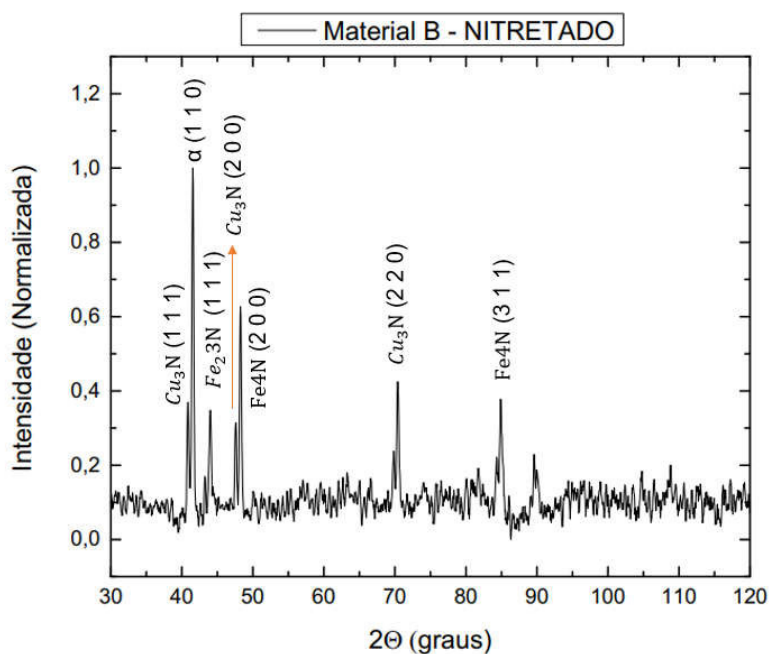
Posição 2θ (graus)	Índice de Miller do Pico	Elemento Químico
40,51°	(1 1 0)	α (Ferro alfa)
41,25°	(1 1 0)	α (Ferro alfa)
42,95°	(1 1 1)	ε (Fe_23N – Nitreto de Ferro)
47,24°	(2 0 0)	Cu_3N – Nitreto de Cobre
48,02°	(2 0 0)	γ' ($Fe4N$ – Nitreto de Ferro)
69,54°	(2 2 0)	Cu_3N – Nitreto de Cobre
84,25°	(3 1 1)	γ' ($Fe4N$ – Nitreto de Ferro)

Fonte: Autoria própria.

Os espectros contidos no ensaio de DRX, para o Material A nitretado, corresponderam com as fichas cristalográficas 01-083-0875, 01-072-2126 e 00-047-1088 comprovando a existência na amostra dos elementos: ferro alfa; nitretos de ferros dos tipos Fe_23N (ε) e $Fe4N$ (γ') e de nitretos de cobre do tipo Cu_3N [85,101].

Da mesma forma, a Figura 29 mostra os difratogramas obtidos para o Material B, também após o processo de nitretação.

Figura 29 – Análise DRX para o Material B Nitretado



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 9, abaixo, mostra a interpretação do ensaio de DRX realizado para o Material B nitretado.

Tabela 9 - Resultados do Difratoograma do Material B NITRETADO

Posição 2θ (graus)	Índice de Miller	Elemento Químico
40,84°	(1 1 1)	Cu_3N - Nitreto de Cobre
41,53°	(1 1 0)	α (Ferro alfa)
44,04°	(1 1 1)	ϵ (Fe_23N – Nitreto de Ferro)
47,58°	(2 0 0)	Cu_3N - Nitreto de Cobre
48,25°	(2 0 0)	γ' ($Fe4N$ – Nitreto de Ferro)
70,39°	(2 2 0)	Cu_3N - Nitreto de Cobre
84,93°	(3 1 1)	γ' ($Fe4N$ – Nitreto de Ferro)

Fonte: Autoria própria.

Para o Material B, são mostrados os padrões de difração correspondentes para a martensita (Fe_3C). Os espectros contidos no ensaio de DRX corresponderam com as fichas cristalográficas 01-083-0875, 01-072-2126 e 00-047-1088 comprovando a existência na amostra dos elementos: ferro alfa; nitretos de ferros dos tipos Fe_23N (ϵ) e $Fe4N$ (γ') e de nitretos de cobre do tipo Cu_3N [85,101].

É importante observar também que ambos os difratogramas apresentados, sendo eles para o Material A (Figura 28) e para o Material B (Figura 29) apresentam entre si uma grande similaridade.

7 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi investigada a caracterização metalúrgica do aço inoxidável martensítico 17-4 PH impresso 3D pelo processo de MA, incorporado ao processo de Moldagem de Metais por Injeção (MIM) e posteriormente submetido ao processo de nitretação gasosa por durante 96 horas para a melhoria de suas propriedades superficiais. Para tal objetivo, foram utilizados dois materiais do aço 17-4 PH: o Material A fabricado por MA e MIM e o Material B fabricado somente por MIM.

A partir dos resultados e discussões é possível concluir que:

- As composições químicas das amostras de ambos os materiais atenderam às especificações requeridas pelos aços inoxidáveis estudados;
- Ambos os materiais apresentaram a microestrutura do metal base constituída por martensita e a camada nitretada homogeneamente distribuída;
- Os valores de microdureza Vickers foram aumentados de forma significativa na superfície após o tratamento termoquímico de nitretação. Ambos os materiais apresentaram uma profundidade de camada nitretada, sendo a do Material A de 0,206mm e a do Material B de 0,230mm.
- Após a nitretação gasosa, o Material A que tinha uma microdureza média do metal base de 245,1 $HV_{0,3}$ obteve uma microdureza superficial média de 895,5 $HV_{0,3}$, representando um aumento da dureza em 365 %. Para o Material B, esses resultados foram de 299,9 $HV_{0,3}$, 854,6 $HV_{0,3}$ e 285 %, respectivamente.
- Em uma análise por MO com um aumento óptico de 2 vezes maior que o mínimo aumento (X vezes), os percentuais de volumes porosos encontrados foram de 13,62% para o Material A e de 13,20% para o Material B. Assim, é evidenciado que ambos os materiais apresentaram valores de porosidades semelhantes entre si.

- Os difratogramas dos materiais A e B, obtidos pelo ensaio de DRX, apresentaram similaridades entre si.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com esse trabalho foi possível estudar e obter a caracterização metalúrgica do aço 17-4 PH impresso tridimensionalmente pelo processo de Manufatura Aditiva (MA) e incorporado ao processo de Moldagem de Metais por Injeção (MIM) e posteriormente submetido ao processo de nitretação gasosa.

9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões aqui dadas referem-se a uma continuação do presente trabalho, com a finalidade de enriquecer a caracterização metalúrgica do aço 17-4 PH fabricado pelo processo FFF de MA, incorporado ao processo MIM e posteriormente submetido ao processo de nitretação gasosa.

Dessa forma, propõem-se pesquisas em que possam:

- Determinar os tipos de tensões residuais presente nas superfícies das amostras;
- Verificar o comportamento de corrosão;
- Avaliar outros processos MA para a confecção da peça verde;
- Estudar o comportamento destes aços na nitretação a plasma;
- Pesquisar o comportamento tribológico dos materiais.

10 REFERÊNCIAS

10.1 REFERÊNCIAS NOMINAIS

- 1 - Ghobakhloo, Morteza. **Industry 4.0, Digitization, and Opportunities for Sustainability**. Journal of Cleaner Production, vol. 252, p. 119869, 2020.
- 2 - Altus. **Conheça Os Nove Pilares Da Indústria 4.0 E Sua Relevância Para a Atividade Industrial**. 2019. Disponível em: <www.altus.com.br/post/212/conheca-os-nove-pilares-da-industria-4-0-e-sua-relevancia-para-a-atividade-industrial>. Acesso em: 15 Fev. 2022.
- 3 - GODINA, R.; RIBEIRO, I.; MATOS, F.; et al. **Impact Assessment of Additive Manufacturing on Sustainable Business Models in Industry 4.0 Context**. Sustainability, v. 12, n. 17, p. 7066, 2020.
- 4 - DORNFELD, D. A. **Moving towards Green and Sustainable Manufacturing**. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology., v. 1, n. 1, p. 63-66, 2014.
- 5 - AHN, Dong-Gyu. **Direct Metal Additive Manufacturing Processes and Their Sustainable Applications for Green Technology: A review**. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, v. 3, n. 4, p. 381–395, 2016.
- 6 - KIM, K.-S.; CHO, Y.-J; JEONG, S.-J. **Simulation of CO2 Emission Reduction Potential of the Iron and Steel Industry Using a System Dynamics Model**. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. v. 15, n. 2, p. 361-373, 2014.
- 7 - STREZOV, V.; EVANS, A.; EVANS, T. **Defining Sustainability Indicators of Iron and Steel Production**. Journal of Cleaner Production, v. 51, p. 66–70, 2013.
- 8 - HUANG, R.; RIDDLE, M.; GRAZIANO, D. **Energy and Emissions Saving Potential of Additive Manufacturing: The Case of Lightweight Aircraft Components**, Journal of Cleaner Production, v. 135, p. 1559–1570, 2016.
- 9 - FORD, S; DESPEISSE, M. **Additive Manufacturing and Sustainability: An Exploratory Study of the Advantages and Challenges**. Journal of Cleaner Production, v. 137, p. 1573–1587, 2016.

- 10 - PETZOLDT, F. **Metal Injection Moulding in Europe — Technological Trends and Business Situation**. WORLDPM2018 Congress, Beijing, China, 2018.
- 11 - GERMAN, R. M; ANIMESH B. **Injection Moulding of Metals and Ceramics**. Princeton, New Jersey: Metal Powder Industries Federation, 1997.
- 12 - HAUCK, Paul. **Advances in Injection Molding of Metals**. In: Molding 2017. [s.l.]:2017. Disponível em: <https://www.moldingconference.com/uploads/9/1/1/3/91131704/hauck_2017.pdf>. Acesso em: 15 Fev. 2022.
- 13 - XIANGJI, Kong. **Development and Characterization of Polymer- Metallic Powder Feedstocks for Microinjection Molding**. [Tese de Doutorado]. Université de Franche-Comté, 2011.
- 14 - REI, M. **Estudo de Propriedades de Cargas Moldáveis por Injeção de Pós de Aço Inoxidável 316-L**. [Dissertação Mestrado], Porto Alegre (RS), 1999.
- 15 - MACHADO, C.F. **Aços Inoxidáveis Sinterizados** [Dissertação Mestrado], UFRGS, Porto Alegre (RS) 1996.
- 16 - TODD, I.; SIDAMBE, A.T. **Developments In Metal Injection Moulding (MIM)**. Advances in Powder Metallurgy, p. 109–146, 2013.
- 17 - MCKINSEY & COMPANY. **McKinsey Report Places MIM in Top Ten “Technologies of the Future”**. PIM International, Vol. 12 No. 2, p. 7, 2018.
- 18 - LOHE, Detlef. **Microengineering of Metals and Ceramics Design, Tooling, and Injection Molding/ Special Replication Techniques, Automation, and Properties**. [s.l.]: Vch Pub, 2008.
- 19 - ATTIA, U. M ; ALCOCK, J. R. **A Review of Micro-Powder Injection Moulding as a Microfabrication Technique**. Journal of Micromechanics and Microengineering, v. 21, n. 4, p. 043001, 2011.
- 20 - NISHIYABU, Kazuaki. **Micro Metal Powder Injection Molding**. Some Critical Issues for Injection Molding, 2012.
- 21 - BUSCHOW, K H J. **Encyclopedia of Materials: Science and Technology**. Oxford: Elsevier, 2001.
- 22 - MATHEW, Boney; MASTROMATTEO, Richard. **Metal Injection Moulding for Automotive Applications**. Metal Powder Report, v. 58, n. 9, p. 32–35, 2003.

- 23 - FERREIRA, T; VIEIRA, M ; COSTA, J. **Manufacturing Dental Implants Using Powder Injection Molding**. Journal of Orthodontics & Endodontics, v. 2, p. 1, 2016.
- 24 - OTT, E. A.; PERETTI, M. W. **Metal Injection Molding of Alloy 718 for Aerospace Applications**. JOM, v. 64, n. 2, p. 252–256, 2012.
- 25 - ASTM F2792-12. **Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- 26 - SINGH, Sunpreet; RAMAKRISHNA, Seeram ; SINGH, Rupinder. **Material Issues in Additive Manufacturing: A review**. Journal of Manufacturing Processes, v. 25, p. 185–200, 2017.
- 27 - VOLPATO, Neri (organizador). **Manufatura aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. Ed. Edgard Blücher Ltda. 2017.
- 28 - FRANCO, Denise. **Impactos da Manufatura Aditiva no Modelo de Negócio**. [Tese de Doutorado], Universidade Federal de São Carlos, São Carlos - SP, 2019.
- 29 - ARANHA, E. F. C. **Análise de viabilidade de um novo processo de manufatura aditiva por aglutinação de compósitos polímero/metais para fabricação de implantes e dispositivos médicos**. [Tese de Doutorado], Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia - Universidade Federal de São Paulo, 2019.
- 30 - PETAR KOCOVIC. **3D Printing and its Impact on the Production of Fully Functional Components : Emerging Research and Opportunities**. Hershey, Pa: Igi Global, Engineering Science Reference, 2017.
- 31 - WOHLERS, Terry; GORNET, Tim. **History of Additive Manufacturing**. [s.l.: s.n.], 2016. Disponível em: <<https://www.wohlersassociates.com/history2016.pdf>>. Acesso em: 15 de Fev. de 2022.
- 32 - GONZÁLEZ, Carlos. **A Timeline of 3D Printing Technology**. [s.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <<https://www.asme.org/topics-resources/content/infographic-the-history-of-3d-printing>>. Acesso em: 15 Fev. 2022.
- 33 - KODAMA, Hideo. **Automatic Method for Fabricating a Three-dimensional Plastic Model with Photo-hardening Polymer**. Review of Scientific Instruments, v. 52, n. 11, p. 1770–1773, 1981.

- 34 - JAIN, Ankit; BANSAL, Kuldeep K.; TIWARI, Ankita; et al. **Role of Polymers in 3D Printing Technology for Drug Delivery - An Overview**. *Current Pharmaceutical Design*, v. 24, n. 42, p. 4979–4990, 2019.
- 35 - MAZZOLI, Alida. **Selective Laser Sintering In Biomedical Engineering**. *Medical & Biological Engineering & Computing*, v. 51, n. 3, p. 245–256, 2012.
- 36 - REPRAP CONTRIBUTORS. **About**. Reprap. Disponível em: <<https://reprap.org/wiki/About>>. Acesso em: 15 Fev. 2022.
- 37 - SHAPEWAYS. **3D Printing Service | Shapeways**. Shapeways.com. Disponível em: <<https://www.shapeways.com/>>. Acesso em: 15 Fev. 2022.
- 38 - UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON. 2011: **Revolutionising Aircraft Design With the World's First Printed Aircraft**. University of Southampton. Disponível em: <<https://www.southampton.ac.uk/engineering/about/making-history/3d-printed-unmanned-aircraft.page>>. Acesso em: 15 Fev. 2022.
- 39 - KOR ECOLOGIC INC. **With Worldwide Interest, Taking It To The Next Level: URBEE 2**. KOR Ecologic. Disponível em: <<https://korecologic.com/>>. Acesso em: 15 Fev. 2022.
- 40 - FERRARA, Jéssica; MUNIZ, Guilherme. **Urbee é carro impresso em 3D que roda 100 km com 1 litro de combustível**. *Auto Esporte*. Disponível em: <<https://autoesporte.globo.com/carros/noticia/2014/02/urbee-e-carro-impresso-em-3d-que-roda-100-km-com-1-litro-de-combustivel.ghtml>>. Acesso em: 15 Fev. 2022.
- 41 - CELLINK. **Aplication Note CELLINK Bioink**. 2019. Disponível em: <http://www.cellink.com/wp-content/uploads/2019/03/CELLINK-Bioink-APP_15-Feb-2019.pdf>. Acesso em: 15 Fev. 2022.
- 42 - EN ISO/ASTM. **Additive Manufacturing General Principles Terminology**, (52900:2017-02); International Organization for Standardization (ISO): Geneve, Switzerland, 2017.
- 43 - GONZALEZ-GUTIERREZ, Joamin; CANO, Santiago; SCHUSCHNIGG, Stephan; et al. **Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: a Review and Future Perspectives**. *Materials*, v. 11, n. 5, p. 840, 2018.
- 44 - CAMPBELL, Thomas; WILLIAMS, Christopher; IVANOVA, Olga; GARRETT, Banning. **Could 3D Printing Change the World?: Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing**. Atlantic Concil, [s. l.], 2011.

- 45 - F42 Committee. **Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.2**; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2016.
- 46 - CHAKRAVORTY, Dibya. **STL File Format (3D Printing) – Simply Explained**. All3DP. Disponível em: <<https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/#pointnine>>. Acesso em: 15 Fev. 2022.
- 47 - AIRBUS. **3D Printing**. Airbus. Disponível em: <<https://www.airbus.com/public-affairs/brussels/our-topics/innovation/3d-printing.html>>. Acesso em: 15 Fev. 2022.
- 48 - MENG, Liang; ZHANG, Weihong; QUAN, Dongliang; et al. **From Topology Optimization Design to Additive Manufacturing: Today's Success and Tomorrow's Roadmap**. Archives of Computational Methods in Engineering, v. 27, n. 3, p. 805–830, 2019.
- 49 - LIU, Jikai; GAYNOR, Andrew T.; CHEN, Shikui; et al. **Current and Future Trends in Topology Optimization for Additive Manufacturing**. Structural and Multidisciplinary Optimization, v. 57, n. 6, p. 2457–2483, 2018.
- 50 - TOMLIN, Matthew ; MEYER, Jonathan. **Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part**. In: The 7th Altair CAE Technology Conference. [s.l.]: Altair Engineering, 2011.
- 51 - SHI, Guanghui; GUAN, Chengqi; QUAN, Dongliang; et al. **An Aerospace Bracket Designed by Thermo-elastic Topology Optimization and Manufactured by Additive Manufacturing**. Chinese Journal of Aeronautics, v. 33, n. 4, p. 1252–1259, 2020.
- 52 - GANESH SARVANKAR, Shruti; YEWALE, Sanket. **Additive Manufacturing in Automobile Industry**. IJRAME - International Journal of Research in Aeronautical and Mechanical Engineering, v. 7, n. 4, 2019.
- 53 - DELOITTE. **Additive manufacturing: 3D opportunity for the automotive industry**. Disponível em: <<https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/3d-opportunity/additive-manufacturing-3d-opportunity-in-automotive.html/#endnote-sup-35>>. Acesso em: 15 Fev. 2022.
- 54 - CHOONG, Yu Ying Clarissa; TAN, Hong Wei; PATEL, Deven C.; et al. **The Global Rise of 3D Printing During The COVID-19 Pandemic**. Nature Reviews Materials, v. 5, n. 9, p. 637–639, 2020.

- 55 - CARDOSO, Carlos. **Impressão 3D Salvando Vidas em Tempos de COVID-19**. Meio Bit. Disponível em: <<https://tecnoblog.net/meiobit/418668/impressao-3d-salvando-vidas-em-tempos-de-covid-19/>>. Acesso em: 15 Fev. 2022.
- 56 - WILLIAMS, N. **Threat or Opportunity? The MIM Industry as a Partner, a Target and a Market for Metal AM**. Powder Injection Moulding International, v. 12, n. 4, p.57–64, 2018.
- 57 - WILLIAMS, B. **WORLDPM2018 Congress: Global MIM Markets Show Healthy Growth**. Powder Injection Moulding International, 12, n. 4, p.67–74, 2018.
- 58 - LYCHEV, S A; KOSTIN, G V; KOIFMAN, K G; et al. **Modeling and Optimization of Layer-by-Layer Structures**. Journal of Physics: Conference Series, v. 1009, p. 012014, 2018.
- 59 - LENGAUER, Walter; DURETEK, Ivica; FÜRST, Markus; et al. **Fabrication and Properties of extrusion-based 3D-printed Hardmetal and Cermet Components**. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, v. 82, p. 141–149, 2019.
- 60 - KOROTCHENKO, A.Yu.; KHILKOV, D.E.; TVERSKOY, M.V.; et al. **Use of Additive Technologies for Metal Injection Molding**. Engineering Solid Mechanics, p. 143–150, 2020.
- 61 - GONZALEZ-GUTIERREZ, Joamin; GODEC, Damir; KUKLA, Christian; et al. **Shaping, Debinding and Sintering of Steel Components via Fused Filament Fabrication**. In: 16th International Scientific Conference on Production Engineering. [s.l.], 2017.
- 62 - KUKLA, C.; DURETEK, I.; SCHUSCHNIGG, S.; GONZALEZ-GUTIERREZ, J.; HOLZER, C. **Properties for PIM Feedstocks Used in Fused Filament Fabrication**. In: World PM2016 Proceedings: EPMA, 2016.
- 63 - ZIAEE, Mohsen; CRANE, Nathan B. **Binder jetting: A Review of Process, Materials, and Methods**. Additive Manufacturing, v. 28, p. 781–801, 2019.
- 64 - JAHANI, Babak; WANG, Xinnan; BROOKS, Amanda. **Additive Manufacturing Techniques for Fabrication of Bone Scaffolds for Tissue Engineering Applications**. Recent Progress in Materials, v. 2, n. 3, p. 1–41, 2020.
- 65 - SAND M. **Metal 3D Printing: Laser Sintering vs. Bulk Sintering in a Furnace - Pros and Cons**. Disponível em: <www.3dprint.com/193946> Acesso em: 15 Fev. 2022.

- 66 - KUZNETSOV, Vladimir E.; SOLONIN, Alexey N.; TAVITOV, Azamat; et al. **Increasing Strength of FFF Three-Dimensional Printed Parts by Influencing on Temperature-related Parameters of the Process**. Rapid Prototyping Journal, v. 26, n. 1, p. 107–121, 2020.
- 67 - THE SPOT TEAM. **The Main Differences Between FFF and FDM Explained | 3D Printing Spot**. Disponível em: <<https://www.3dprintingspot.com/post/the-main-differences-between-fff-and-fdm-explained>>. Acesso em: 15 Fev. 2022.
- 68 - S.C. Danforth, M. Agarwala, A. Bandyopadhyay, N. Langrana, V.R. Jamalabad, A. Safari, R. Van Weeren, **Solid freeform fabrication methods**, US Patent 5738817, 1998.
- 69 - BURKHARDT, Carlo; FREIGASSNER, Peter; WEBER, Oxana; et al. **Fused Filament Fabrication (FFF) of 316L Green Parts for the MIM Process**. In: World PM2016. [s.l.: s.n.], 2016.
- 70 - LOW, Ze-Xian; CHUA, Yen Thien; RAY, Brian Michael; et al. **Perspective on 3D Printing of Separation Membranes and Comparison to Related Unconventional Fabrication Techniques**. Journal of Membrane Science, v. 523, p. 596–613, 2017.
- 71 - HEALY, Andrew; WALDRON, Cathal; GEEVER, Luke; et al. **Degradable Nanocomposites for Fused Filament Fabrication Applications**. Journal of Manufacturing and Materials Processing, v. 2, n. 2, p. 29, 2018.
- 72 - METAL AM. **BASF Launches Ultrafuse 316LX for Fused Filament Fabrication of Metal Parts. Metal Additive Manufacturing**. Disponível em: <<https://www.metal-am.com/basf-launches-ultrafuse-316lx-fused-filament-fabrication-metal-parts/>>. Acesso em: 15 Fev. 2022.
- 73 - BASF. **BASF Ultrafuse 316L – Metal Filament for Industrial 3D Printing**. Disponível em: <https://www.basf.com/global/en/who-we-are/organization/group-companies/BASF_New-Business-GmbH/news/press-releases/2019/p-19-07-23_Ultrafuse.html>. Acesso em: 15 Fev. 2022.
- 74 - CARBÓ, HÉCTOR MARIO. **Aços inoxidáveis: Aplicações e Especificações**. ArcelorMittal. [S.l.]. 2008.
- 75 - INFOMET. **Aços Inoxidáveis Austeníticos**. Infomet. Disponível em: <<https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=205>>. Acesso em: 15 Fev. 2022.

- 76 - BASF. **Ultrafuse 316LX Technical Data Sheet**. 2017. Disponível em: <https://www.basf.com/global/de/documents/about-us/Companies/new-business-gmbh/publications/3d-printing/TDS_BASF_Ultrafuse-316LX.pdf>. Acesso em: 15 Fev. 2022.
- 77 - SAFKA, Jiri; ACKERMANN, Michal; MACHACEK, Jakub; et al. **Fabrication Process and Basic Material Properties of the Basf Ultrafuse 316LX Material**. MM Science Journal, v. 2020, n. 5, p. 4216–4222, 2020.
- 78 - THOMPSON, Yvonne; GONZALEZ-GUTIERREZ, Joamin; KUKLA, Christian; et al. **Fused Filament fabrication, Debinding and Sintering as a Low Cost Additive Manufacturing Method of 316L Stainless Steel**. Additive Manufacturing, v. 30, p. 100861, 2019.
- 79 - KUROSE, Takashi; ABE, Yoshifumi; SANTOS, Marcelo V. A.; et al. **Influence of the Layer Directions on the Properties of 316L Stainless Steel Parts Fabricated through Fused Deposition of Metals**. Materials, v. 13, n. 11, p. 2493, 2020.
- 80 - Davis, J R, et al. **ASM Specialty Handbook: Stainless Steels**. Materials Park, Ohio, Asm International, 1994.
- 81 - LAMB, Stephen. **Practical Handbook of Stainless Steels & Nickel Alloys**. Edmonton, Alta., Casti Pub.; Materials Park, Ohio, 1999.
- 82 - BASF. **Ultrafuse 17-4 PH Technical Data Sheet**. 2020. Disponível em: <https://www.basf.com/global/de/documents/about-us/Companies/new-business-gmbh/press-releases/201202_Press-Release_Forward-AM-Launch-Ultrafuse-174PH.pdf>. Acesso em: 15 Fev. 2022.
- 83 - FORWARD AM. **Ultrafuse® 17-4 PH - the Filament Enabling Stainless Steel Parts for Applications That Require High Hardness and Mechanical Strength**. Disponível em: <<https://forward-am.com/material-portfolio/ultrafuse-filaments-for-fused-filaments-fabrication-fff/metal-filaments/ultrafuse-17-4-ph/>>. Acesso em 15 Fev. 2022.
- 84 – SINGH, Gurminder; MISSIAEN, Jean; BOUVARD, Didier; et al. **Additive Manufacturing of 17–4 PH Steel Using Metal Injection Molding Feedstock: Analysis of 3D Extrusion Printing, Debinding and Sintering**. Additive Manufacturing, vol. 47, p. 102287, 2021.
- 85 - MURR, Lawrence; MARTINEZ, Edwin; HERNANDEZ, Jennifer; et al. **Microstructures and Properties of 17-4 PH Stainless Steel Fabricated by**

- Selective Laser Melting.** Journal of Materials Research and Technology, vol. 1, n. 3, p. 167–177, 2012.
- 86 - HUBER, Daniel; VOGEL, Lucas; FISCHER, Alfons. **The Effects of Sintering Temperature and Hold Time on Densification, Mechanical Properties and Microstructural Characteristics of Binder Jet 3D Printed 17-4 PH Stainless Steel.** Additive Manufacturing, vol. 46, p. 102114, 10.1016, 2021.
- 87 - DUONG NAM, Nguyen; ANH XUAN, Nguyen; VAN BACH, Nguyen; et al. **Control Gas Nitriding Process: A Review.** Journal of Mechanical Engineering Research and Developments, v. 42, n. 1, p. 17–25, 2019.
- 88 - CZERWINSKI, Frank. **Thermochemical Treatment of Metals. Heat Treatment - Conventional and Novel Applications**, 2012. Disponível em: <<https://www.intechopen.com/books/heat-treatment-conventional-and-novel-applications/thermochemical-treatment-of-metals>>. Acesso em: 15 Fev. 2022.
- 89 - BABU, P. Dinesh; BALASUBRAMANIAN, K.R. ; BUVANASHEKARAN, G. **Laser Surface Hardening: A Review.** International Journal of Surface Science and Engineering, v. 5, n. 2/3, p. 131, 2011.
- 90 - GRILL, A. **Review of the Tribology of Diamond-like carbon.** Wear, v. 168, n. 1-2, p. 143–153, 1993.
- 91 - PICCILLI, Marcos Rolando. **Otimização do Processo De Nitretação Gasosa na Redução de Trincas em Anéis de Pistão Para Motores de Combustão Interna.** Dissertação de Mestrado, UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá, 2009.
- 92 - American Society For Metals. **Metals Handbook: Heat Treating, Vol. 4.** 9 ed. Metals Park, Oh, American Society For Metals, 1981.
- 93 - Jacobsen, S.D., et al. **Influence of Current Density on Phase Formation and Tribological Behavior of Plasma Nitrided AISI H13 Steel.** Surface and Coatings Technology, vol. 286, pp. 129–139, 2016.
- 94 - RANALLI, G. A.; PALLONE, A. S. N.; PEREIRA, V. F.; et al. **Efeitos Da Nitretação Por Plasma Com pós-oxidação E Por Banho De Sal Na Resistência À Corrosão De Um Aço Ferramenta.** Revista Matéria (UFRJ), v. 14, n. 2, p. 814–823, 2009.
- 95 - ZHANG, Xiangfeng; WANG, Jun; FAN, Hongyuan; et al. **Erosion–corrosion Resistance Properties of 316L Austenitic Stainless Steels After Low-**

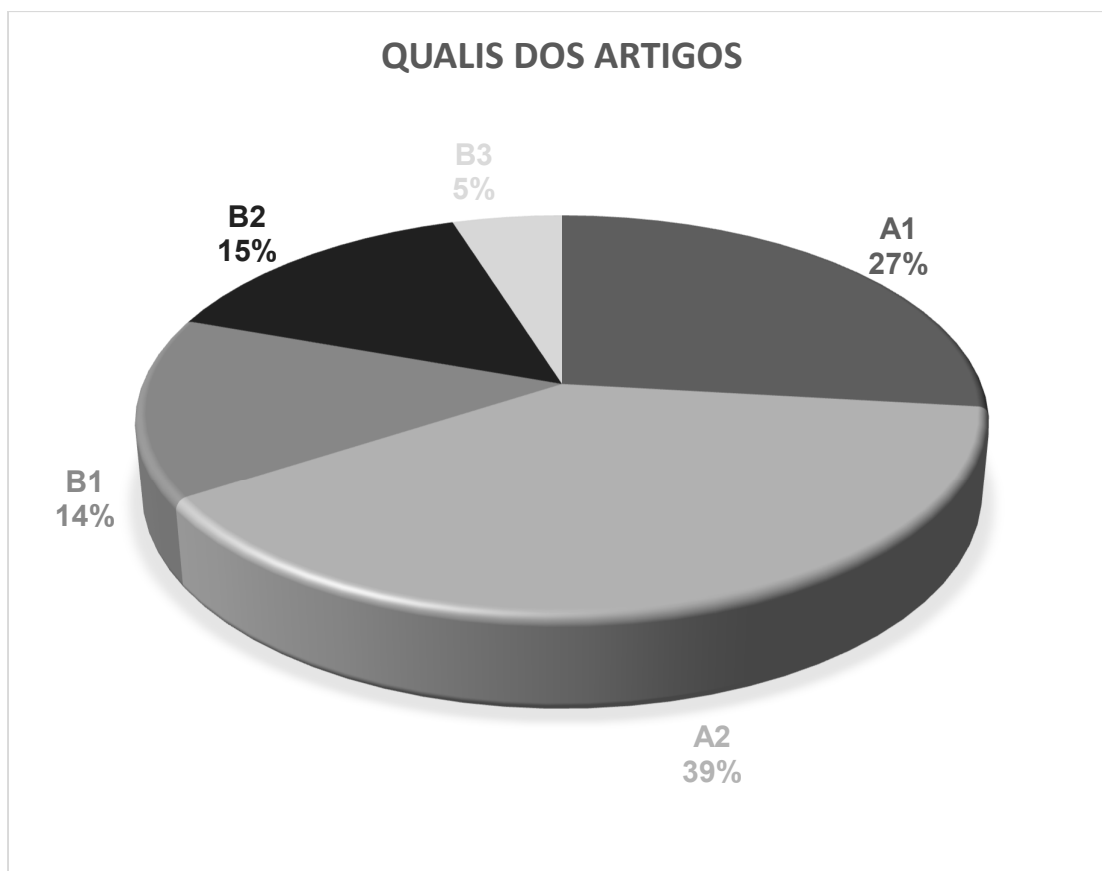
- Temperature Liquid Nitriding.** Applied Surface Science, v. 440, p. 755–762, 2018.
- 96 - **Aerospace Materials Specification AMS2759/8A**, Ion Nitriding, 2007.
- 97 - GARZÓN, C.M.; TSCHIPTSCHIN, A.P.; TORO, A.O. **Microstructure and Chemical Characterization of High Temperature Nitrided 12 %Cr Stainless Steels.** Transactions of the Indian Institute of Metals, v. 55, n. 4, pp. 255-263, 2002.
- 98 - OCHOA, E.; FIGUEROA, C. A.; WISNIVESKY, D.; et al. **Plasma Nitriding of AISI 4140 Steel: Influence of the Ion Current Density on Its Physical Properties.** In: Temas de Tratamento Térmico. [s.l.: s.n.], 2003.
- 99 - SILVA JUNIOR, A. (2016). **Influência de Nitretação à Plasma Sobre a Resistência à Fadiga do Aço API 5L Grau B.** [Tese de Doutorado]. Doutorado em Ciências Mecânicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 155 p, 2016.
- 100 – RIAZI, Hamidreza; ASHRAFIZADEH, Fakhreddin; HOSSEINI, Sayed; et al. **Influence of Simultaneous Aging and Plasma Nitriding on Fatigue Performance of 17-4 PH Stainless Steel.** Materials Science and Engineering: A, vol. 703, pp. 262–269, 2017.
- 101 - VITOI, Amanda; MAGNABOSCO, Rodrigo; PINEDO, Carlos; et al. **Nitretação Sob Plasma por Tela Ativa e Plasma Direto/DC do Aço Inoxidável Endurecível por Precipitação Tipo 17-4 PH**, p. 1249-1258. In: **70º Congresso Anual da ABM**, Rio de Janeiro, 2015.
- 102 - IONITECH. **Plasma Nitriding: Process and Advantages.** www.ionitech.com. Disponível em: <<https://www.ionitech.com/plasma-nitriding/process-and-advantages.html>>. Acesso em: 15 Fev. 2022
- 103 - PYE, David. **Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing.** Materials Park (Ohio): Asm International, Cop, 2003.
- 104 - TÜRK, Ahmet; OK, Orcun; BINDAL, Cuma. **Structural Characterization of Fluidized Bed Nitrided Steels.** Vacuum, v. 80, n. 4, p. 332–342, 2005.
- 105 - TURKDOGAN, E.; IGNATOWICZ, S. **The Solubility of Nitrogen in Iron-Chromium Alloys.** The Journal of The Iron and Steel Institute, p. 242-247, 1958.
- 106 - HARTLINE A.G. **Process for Producing Austenitic Ferrous Alloys.** Patente DE2518452, 1976.

- 107 - GARZÓN, C. M.; TSCHIPTSCHIN A. P. **Nitretação em Alta Temperatura de Aços Inoxidáveis**. Revista Matéria (UFRJ), v. 10, n. 4, pp. 502-525, 2005.
- 108 - DUONG NAM, Nguyen; ANH XUAN, Nguyen; VAN BACH, Nguyen; et al. **Control Gas Nitriding Process: A Review**. Journal of Mechanical Engineering Research and Developments, v. 42, n. 1, p. 17–25, 2019.
- 109 - HUSSAIN, P; MAHMOUD, H; BASHA, S N; et al. **Correlation Between Microstructure and Micro-hardness of 316L Nitrided Austenitic Stainless Steel**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 863, p. 012025, 2020.
- 110 - BOTTOLI, Federico; JELLESEN, Morten S.; CHRISTIANSEN, Thomas L.; et al. **High Temperature Solution-nitriding and Low-temperature Nitriding of AISI 316: Effect on Pitting Potential and Crevice Corrosion Performance**. Applied Surface Science, v. 431, p. 24–31, 2018.
- 111 - T.L. Christiansen; T.S. Hummelshøj; M.A.J. Somers. **WO2013159781-A1**, 2013.
- 112 - AMERICAN WELDING SOCIETY. Structural Welding Code - Steel. **American National Standards Institute, Standards**, 2000.
- 113 - Ito, Y.; Bessyo, K. **Weldability Formula of High Strength Steels: Related to Heataffected Zone Crackin**. IIW Doc. IX 576-68, International Institute of Welding, AWS, Miami, Florida, 1968.
- 114 - ASTM. **E384-17: Standard Test method for Microindentation Hardness of Materials**. ASTM International, West Conshohocken, 2017.
- 115 - MALISKA, Ana Maria. **Microscopia Eletrônica de Varredura**. Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de caracterização microestrutural e análise de imagens. Apostila. Disponível em <http://www.usp.br/nanobiodev/wp-content/uploads/MEV_Apostila.pdf> Acesso em: 15 de Fev. de 2022.
- 116 - CALLISTER, William D; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 10a.ed., Livros Técnicos e Científicos (LTC), 2020.
- 117 - GOMES, L; FURTADO, A; SOUZA, M. **A Sílica e Suas Particularidades**. Revista Virtual de Química, v. 10, n. 4, 2018.

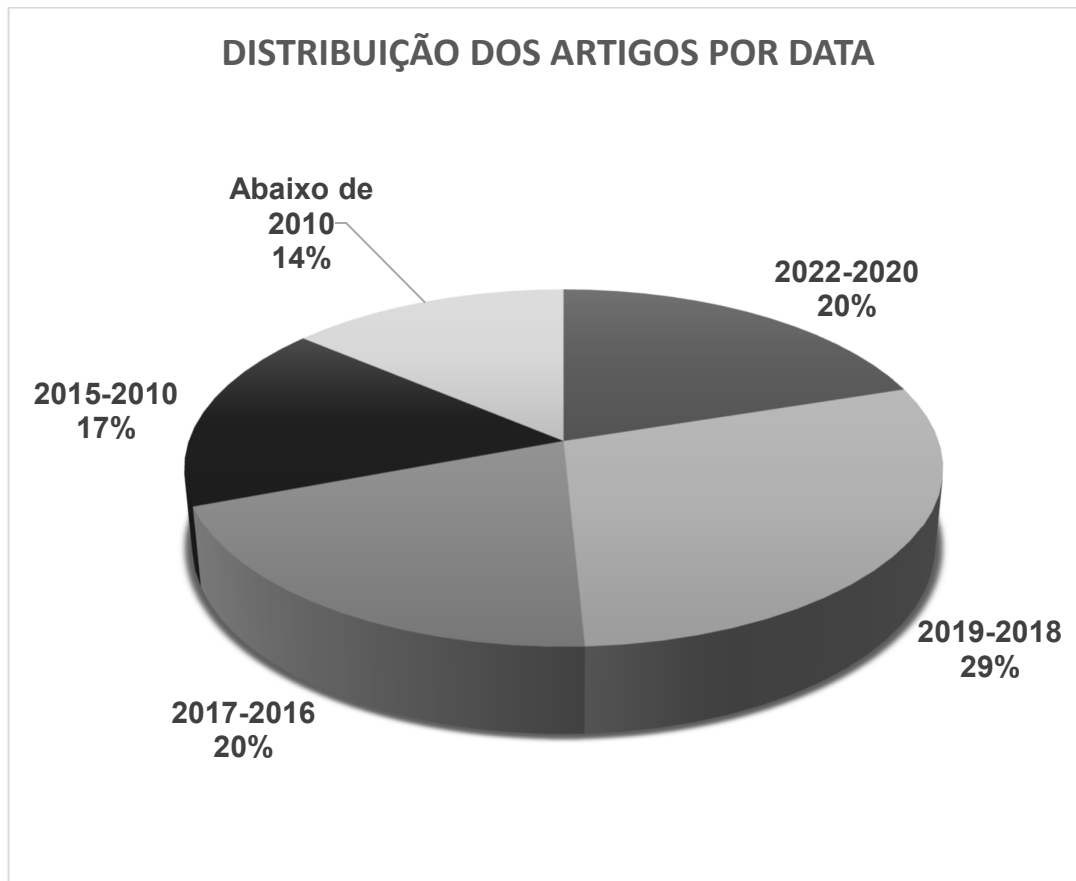
10.2 REFERÊNCIAS POR ESTRATO



10.3 REFERÊNCIAS POR QUALIS



10.4 REFERÊNCIAS POR DATA DOS ARTIGOS



ANEXO A – OUTROS TERMOS UTILIZADOS QUE SE REFEREM A ADDITIVE MANUFACTURING (AM)

Termos encontrados na literatura, por outros autores, normas e afins que também podem estar se referindo a Manufatura Aditiva são ilustrados no quadro A.

Quadro A - Termos da literatura que podem se referir a Manufatura Aditiva.

Termos existentes na literatura	Termo utilizado
3D printed/printing direct	
Additive fabrication	
Additive layered fabrication/manufacturing	
Additive manufactured/manufacturing	
Additive processes	
Additive techniques	
Digital fabrication	
Digital manufacturing	
Direct digital manufacturing	
eManufacturing	Manufatura Aditiva (MA)
Freeform fabrication	Additive Manufacturing (AM)
Generative manufacturing	
Increasing material manufacturing	
Layer manufacturing	
Rapid prototyping	
Rapid manufacturing	
Rapid tooling	
Tridimensional printed/printing	
Three dimensional printed/printing	

Fonte: FRANCO, (2019 p.224) [28].