

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO PAULO FURLAN

MANUFATURA ADITIVA DE AÇOS *MARAGING*

LONDRINA

2022

JOÃO PAULO FURLAN

MANUFATURA ADITIVA DE AÇOS *MARAGING*

Additive manufacturing of maraging steels

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa.

LONDRINA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JOÃO PAULO FURLAN

MANUFATURA ADITIVA DE AÇOS *MARAGING*

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 14/junho/2022

Marcio Andreato Batista Mendes
Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Raphael Euclides Prestes Salem
Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Silvia Midori Higa
Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LONDRINA

2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado condições de superar os desafios.

Agradeço aos meus pais, Nair e Marcio, e outros familiares por sempre acreditar e me apoiar.

Agradeço a minha orientadora Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa, pela disposição em me orientar e passar seus ensinamentos.

Aos Professores e meus colegas de sala.

Enfim, agradeço a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Por possuir características únicas, as técnicas de manufatura aditiva apresentam uma série de vantagens em sua utilização. Algumas delas são a rápida modelagem e a possibilidade de fabricar peças com geometria complexa, necessitando apenas de um programa de CAD/CAM 3D. Assim, é de extrema importância que essas técnicas possam ser aplicadas a diversos tipos de matéria-prima, como por exemplo, os aços *maraging*, que são aços de ultra alta resistência, muito utilizados em aplicações aeronáuticas e aeroespaciais. Neste trabalho realizou-se inicialmente uma revisão bibliográfica sobre os aços *maraging* e, com base na literatura, investigou-se a possibilidade da utilização de aços *maraging* como matéria-prima na manufatura aditiva e, por fim, compararam-se também as vantagens e desvantagens das duas técnicas mais promissoras em relação as técnicas convencionais. Foi possível concluir que as excelentes propriedades dos aços *maraging* são provenientes da matriz martensítica e da presença de precipitados. Dentre as técnicas analisadas, duas se mostraram promissoras: a sinterização direta de metal a *laser* e a conformação próxima ao formato final via *laser*, com capacidade de no futuro ser alternativas as técnicas convencionais na fabricação de determinados produtos. Além dessas duas, outras técnicas de interesse foram analisadas: a fusão por feixe de elétrons, que pode ser usada para tratamento superficial; a técnica de jato de aglutinante para fabricação de materiais celulares; e a técnica de laminação por camada para unir camadas metálicas formando um compósito metálico. Em relação às técnicas de produção de pós metálicos, a atomização a plasma, para obtenção de pós de titânio, e a atomização a gás, para produzir pós dos outros elementos de liga dos aços *maraging*, conferem partículas esféricas que contribuem para o processo da manufatura aditiva.

Palavras-chave: manufatura aditiva; aços *maraging*; pós metálicos.

ABSTRACT

Due to their unique characteristics, additive manufacturing techniques have a number of advantages in their use. Some of them are the fast modeling and the possibility to manufacture parts with complex geometry, requiring only a 3D CAD/CAM program. Thus, it is extremely important that these techniques can be applied to different types of raw materials, such as maraging steels, which are ultra-high strength steels, widely used in aeronautical and aerospace applications. This work initially carried out a literature review on maraging steels and, based on the literature, investigated the possibility of using maraging steels as raw material in additive manufacturing and, also compared the advantages and disadvantages of the two most promising techniques in relation to the conventional techniques. It was possible to conclude that the excellent properties of maraging steels come from the martensitic matrix and the presence of precipitates. Among the techniques analyzed, two proved to be promising: direct sintering of metal by laser and laser engineered net shaping, with the potential to be alternatives in the future to conventional techniques in the manufacture of certain products. In addition to these two, other techniques of interest were analyzed: electron beam fusion, which can be used for surface treatment; the binder jet technique for fabrication of cellular materials; and the layer lamination technique for joining metallic layers to form a metallic composite. Regarding metal powder production techniques, plasma atomization, to obtain titanium powders, and gas atomization, to produce powders from other alloying elements of maraging steels, provide spherical particles that contribute to the process of additive manufacturing.

Keywords: additive manufacturing; maraging steel; metallic powders.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tratamento térmico do aço <i>maraging</i> MLX19®	16
Figura 2 - Esquema representativo do processo de atomização a plasma.....	18
Figura 3 - Esquema representativo do processo de atomização por água.....	19
Figura 4 - Esquema representativo do funcionamento do processo de atomização a gás.....	20
Figura 5 - Esquema representativo do funcionamento do equipamento DMLS	23
Figura 6 - Esquema representativo do funcionamento do equipamento EBM ..	24
Figura 7 - Esquema representativo do funcionamento do equipamento LENS.	25
Figura 8 - Esquema representativo do funcionamento do equipamento de <i>Binder jetting</i>	26
Figura 9 - Esquema representativo do funcionamento do equipamento de laminação por camadas.....	26
Figura 10 - Fluxograma da metodologia de estudo.....	27
Figura 11 - Representação esquemática das microestruturas de aços <i>maraging</i>	29
Figura 12 - Diagrama do níquel metaestável, apresentando três campos de fases: γ (austenita); $\gamma + \alpha$; e α . Linha verde indicando 18%de níquel	30
Figura 13 – (a,b) Micrografias ópticas, (c,d) imagens de TEM mostrando a microestrutura do aço <i>maraging</i> fabricado por SLM em fusão de leito em pó .	32
Figura 14 – Densidade relativa <i>versus</i> velocidade de varredura para diferentes valores de espessura de camada	33
Figura 15 - Valores de rugosidade média medidos na superfície <i>versus</i> velocidade de varredura para diferentes espessuras de camadas com intervalo de confiança de 95%	33
Figura 16 - Dureza média medida em seções transversais <i>versus</i> velocidade de varredura para diferentes espessuras de camadas com 95% de intervalo de confiança.....	34
Figura 17 - Microdureza média das seções transversais <i>versus</i> velocidade de varredura para diferentes espessuras de camadas com 95% de intervalo de confiança.....	34
Figura 18 - Ilustração das seções de cortes transversais e longitudinal com o respectivo eixo de fabricação	35
Figura 19 - Micrografia após ataque químico a) topo-cs2 b) lateral-cs1 de uma amostra de aço <i>maraging</i> fabricada utilizando sinterização direta de metal a <i>laser</i>	35
Figura 20 - Microscopia eletrônica de varredura a) topo-cs2 b) lateral-cs1 de uma amostra de aço <i>maraging</i> fabricada utilizando sinterização direta de metal a <i>laser</i>	36
Figura 21 - Curvas S-N para amostras impressas na direção <i>x</i>	37
Figura 22 - Curvas S-N para amostras impressas na direção <i>z</i>	37
Figura 23 - Morfologia da camada superior da amostra SLM 18Ni-300. Parâmetros de processo: potência do <i>laser</i> : 350 W; velocidade de varredura: 1200 mm/s; distância de hachura: 0,12 mm; densidade energética: 60,76 J/mm ³ ; ângulo de construção: 50°	40
Figura 24 - Comparação da morfologia da camada superior da amostra SLM MS a) 18Ni-300 e (b) 18Ni-300 com tratamento posterior de irradiação de feixe de elétrons. Parâmetros de processo: potência do <i>laser</i> : 350 W; velocidade de	

varredura: 1200 mm/s; distância de hachura: 0,12 mm; densidade energética: 60,76 J/mm ³ ; ângulo de construção: 30°	41
Figura 25 - Porosidade de amostras de aço <i>maraging</i> fabricadas por LENS	42
Figura 26 - Microestrutura da amostra com espessura de camada de 0,5 mm .	43
Figura 27 - Microscopia eletrônica de varredura da amostra com espessura de camada de 0,5 mm com escala de 20 µm.....	43
Figura 28 - Gráfico das microdurezas das amostras de diferentes espessuras	44
Figura 29 - Ciclos de redução e sinterização da amostra de aço <i>maraging</i>	45
Figura 30 - Características da interface do compósito multicamada prensado a quente a) externa; b) interna	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aços <i>maraging</i> , sua composição (% em massa) e limite de escoamento	15
Tabela 2 - Características do pó metálico em função do seu processo de fabricação	21
Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos aços <i>maraging</i> 200, 250, 300 e 350 solubilizados a 815 °C por 1 hora e resfriamento ao ar	30
Tabela 4 - Propriedades de tração das amostras de aço <i>maraging</i> como impressas e tratadas termicamente	38
Tabela 5 - Energia absorvida de amostras de aço <i>maraging</i> como impressas e tratadas termicamente	38
Tabela 6 - Resultados do ensaio de tração das amostras de diferentes espessuras.....	44
Tabela 7 - Comparativo das vantagens e desvantagens entre as técnicas promissoras de MA e convencionais de fabricação de peças de aços <i>maraging</i>	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

YS	Limite de Escoamento
3D	Três Dimensões
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	Desenho Assistido por Computado
DMLS	Sinterização Direta de Metal a <i>Laser</i>
EMB	Fusão por Feixe de Elétrons
GA	Atomização a Gás
HDH	Hidretação-Dehidretação
LENS	Conformação Próxima ao Formato Final via <i>Laser</i>
PA	Atomização a Plasma
SLS	Sinterização Seletiva a <i>Laser</i>
SLM	Fusão Seletiva a <i>Laser</i>
MA	Manufatura Aditiva
TEM	Microscópio Eletrônico de Transmissão
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Objetivos.....	12
1.1.1	Objetivo Geral.....	12
1.1.2	Objetivos Específicos.....	12
1.2	Justificativa.....	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1	Aços <i>Maraging</i>.....	14
2.1.1	Aplicações dos Aços <i>Maraging</i> em Componentes Aeronáuticos e Aeroespaciais.....	15
2.2	Produção de Pós Metálicos.....	17
2.2.1	Atomização a Plasma (PA).....	17
2.2.2	Atomização por Água.....	18
2.2.3	Atomização a Gás (GA)	19
2.2.4	Hidretação-Dehidretação (HDH).....	20
2.2.5	Variáveis de Processos.....	20
2.3	Manufatura Aditiva de Metais.....	22
2.3.1	Desenvolvimento da Primeira Tecnologia de Impressão 3d de Metais...22	
2.3.2	Sinterização Direta de Metal a <i>Laser</i>	23
2.3.3	Fusão por Feixe de Elétrons.....	24
2.3.4	Conformação Próxima ao Formato Final via <i>Laser</i>	24
2.3.5	Jato de Aglutinante.....	25
2.3.6	Laminação por Camadas.....	26
3	METODOLOGIA.....	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
4.1	Microestrutura e Propriedades Mecânicas dos Aços <i>Maraging</i>.....	28
4.2	Manufatura Aditiva de Aços <i>Maraging</i>.....	31
4.2.1	Sinterização Direta de Metal a <i>Laser</i>	31
4.2.2	Fusão por Feixe de Elétrons.....	39
4.2.3	Conformação Próxima ao Formato Final Via <i>Laser</i>	42
4.2.4	Jato de Aglutinante.....	45
4.2.5	Laminação por Camadas.....	45
4.3	Análise da Viabilidade da Manufatura Aditiva para Aços <i>Maraging</i> 46	
5	CONCLUSÃO.....	49

REFERÊNCIAS.....	50
-------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

Os métodos de manufatura aditiva de metais consistem em depositar camadas progressivamente, uma sobre a outra, até formar um objeto, seguindo um modelo digital em 3D. É uma tecnologia relativamente recente, sendo desenvolvida na década de 1990, e que trouxe algumas características novas até então, como por exemplo a rápida prototipagem, a fabricação de peças com geometrias complexas e as customizações de componentes que seriam difíceis de serem fabricados de maneira convencional (OLIVEIRA; LALONDE; MA, 2020).

Algumas ligas processadas por manufatura aditiva apresentam propriedades superiores às fundidas ou forjadas, isso em função da alta taxa de resfriamento proveniente do processo, que resulta em tamanhos de grãos pequenos, e também com poucos defeitos. Outro benefício dessa técnica é a possibilidade de criar estruturas com gradientes tanto na microestrutura como na composição (OLIVEIRA; LALONDE; MA, 2020).

Além do tamanho de grão reduzido resultante da rápida solidificação, pode haver a formação de fases metaestáveis e a segregação de elementos, pois o fundido é forçado a solidificar rápido demais. Essas altas temperaturas que são atingidas durante o processo, devido ao feixe de elétrons ou ao *laser*, podem causar mudanças macroscópicas em ligas que são extremamente sensíveis à composição (OLIVEIRA; LALONDE; MA, 2020).

Nas áreas aeroespacial e aeronáutica, as ligas de titânio, de alumínio e alguns aços já são matérias-primas empregadas utilizando manufatura aditiva. Entretanto, os aços de ultra alta resistência, que apresentam uma quantidade significativa de elementos de liga em sua composição, ainda são um desafio para o setor devido às certificações de matérias-primas e de processos por parte de autoridades aeronáuticas, além da pouca informação quanto ao comportamento sob carregamentos cíclicos (GOMES; WILTGEN; 2020).

A partir desse contexto, este trabalho propõe um estudo teórico por meio de pesquisa e discussão dos fatores que desafiam o emprego dos aços *maraging* via manufatura aditiva, considerando as diferentes técnicas desse processamento.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal a realização de um estudo teórico sobre a utilização de aços *maraging* como matéria-prima na manufatura aditiva.

1.1.2 Objetivos Específicos

Foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a composição química e o comportamento dos elementos de liga nas propriedades mecânicas dos aços *maraging*;
- Discutir as técnicas de manufatura aditiva em metais, analisando, dentre elas, a(s) mais apropriada(s) para fabricação de componentes de aços *maraging*;
- Avaliar as vantagens e desvantagens da manufatura aditiva em relação aos processos convencionais de fabricação de componentes de aços *maraging*.

1.2 Justificativa

O mercado de manufatura aditiva movimentou US\$ 9,785 bilhões no ano de 2018, crescimento de 33,5% comparado com o ano anterior, e teve um crescimento de 7,4 vezes nos últimos 9 anos, não somente em equipamentos, mas também em produtos e serviços. Estima-se que no ano de 2025 só o valor de componentes fabricados por manufatura aditiva chegue ao total de US\$ 8,4 bilhões (WOHLERS, 2019).

Recentemente, as empresas Sandvik Additive Manufacturing (Suécia) e Renishaw (Inglaterra) firmaram uma parceria com foco na qualificação de novos materiais aplicáveis à manufatura aditiva, trabalhando tanto nos parâmetros de processo como na composição de novas ligas metálicas. Dentre as matérias-primas para a manufatura aditiva estão os aços *maraging*, cuja resistência e dureza foram melhoradas a partir de alterações na sua composição (USINAGEM-BRASIL, 2019).

Com o crescimento do emprego da manufatura aditiva em diversos setores, a sua utilização para fabricação de componentes de aços de ultra alta resistência ainda é um desafio a ser superado, pois esses aços apresentam um alto teor de elementos de liga, que quando sinterizados a *laser* ou feixe de elétrons podem ter alterações macroscópicas, além da rápida solidificação que pode formar fases metaestáveis e segregação de elementos químicos (GORSSE et al, 2017).

Neste contexto, um estudo sobre a utilização desses aços como matérias-primas para a manufatura aditiva é de grande importância para a fabricação e desenvolvimento de componentes aeronáuticos e aeroespaciais que não podem ser produzidos utilizando outras ligas, devido às propriedades requeridas, como boa resistência mecânica, excelente resistência a corrosão e baixa densidade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aços *Maraging*

Os aços são ligas metálicas formadas de ferro e carbono, sendo o segundo material mais consumido dentro da classe de materiais ferrosos perdendo apenas para os ferros fundidos, a quantidade produzida nacionalmente pode servir como indicador de industrialização de um país. No Brasil, foram produzidos 31 milhões de toneladas de aço em 2020, se destacando na nona posição mundial em produção anual de aço (GANDRA, 2021).

Dentre os aços de ultra alta resistência, ou seja, aqueles que apresentam limite de escoamento acima de 1000 MPa, se destacam os aços *maraging*, que têm esse nome devido à junção do termo *martensite*, que significa em português martensita, e *aging*, que significa envelhecimento. Sua dureza advém da precipitação de compostos intermetálicos em uma matriz martensítica formada durante o tratamento térmico. Esses aços podem atingir elevados níveis de resistência à tenacidade e à fratura, e atingir limites de escoamento na faixa de 1000 a 2500 MPa (SILVA; MEI, 1988).

Outra importante propriedade dos aços *maraging* é a resistência a corrosão. Em ambientes industriais e marítimos, os *maraging* apresentam metade da corrosão de aços convencionais, devido à matriz martensítica de ferro e níquel (POORNIMA; JAGANNATHA; SHETTY, 2010).

Há outras duas importantes características desses aços, como a baixa variação nas dimensões de peças usinadas, após serem submetidas ao tratamento térmico, e a excelente soldabilidade, em função da baixa concentração de carbono (teor máximo 0,03%), que tornam o aço *maraging* uma excelente opção para aplicação no setor aeroespacial, pela elevada resistência específica, e como ferramentas, em virtude da baixa variação dimensional (SILVA; MEI, 1988).

Os aços *maraging* foram desenvolvidos por George Bieber nos anos 50, época na qual a demanda por aços de baixa densidade e resistentes a temperaturas para uso aeronáutico era elevada, sendo que as primeiras ligas desenvolvidas possuíam 20 e 25% de níquel. Posteriormente, com o estudo e desenvolvimento da liga, a porcentagem de níquel diminuiu para os atuais 18%. A composição dos aços *maraging*, além do alto teor de níquel, também apresenta cobalto, molibdênio, além

de pequenas quantidades de titânio e alumínio, como apresentado na Tabela 1 (SHA; GUO, 2009).

Tabela 1 - Aços *maraging*, sua composição (% em massa) e limite de escoamento

Liga	Ni	Mo	Co	Ti	Al	Limite de escoamento (MPa)
18Ni (200)	18	3,3	8,5	0,2	0,1	1400
18Ni (250)	18	5	8,5	0,4	0,1	1700
18Ni (300)	18	5	9	0,7	0,1	2000
18Ni (350)	18	4,2	12,5	1,6	0,1	2400
18Ni (Fundido)	17	4,6	10	0,3	0,1	1650

Fonte: Adaptado de Sha e Guo (2009)

Como já descrito, a denominação de aço *maraging* vem do envelhecimento da martensita, que é a fase presente nesses aços. No caso dos aços *maraging*, a martensita é facilmente obtida devido ao alto teor de níquel presente e é formada durante o resfriamento, diferentemente da martensita formada nos aços comuns, que é formada a partir do carbono. Nos aços *maraging*, o carbono é tratado como impureza, sendo aceito em níveis muito baixos em produtos comerciais. A martensita sem carbono é bastante mole, mas durante o tratamento térmico de envelhecimento, ocorre a precipitação de Ni_3Mo , Ni_3Ti , Ni_3Al e Fe_2Mo , aumentando a dureza, a resistência mecânica e a ductilidade (SHA; GUO, 2009).

Devido às dificuldades econômicas na utilização de alguns elementos que fazem parte do aço *maraging*, como o alto preço do cobalto e também o custo de processamento do níquel, estudos recentes vêm sendo feitos para retirar o cobalto e assim tentar reduzir o custo da liga. Entre os candidatos à substituição do níquel e à eliminação do cobalto estão a utilização de elementos mais baratos como o manganês e o cromo. Os aços *maraging* também estão sendo estudados como possíveis substituintes do aço 4340, que é amplamente utilizados na indústria aeronáutica e automotiva (RODRIGUES; BERNARDI; OTUBO, 2014).

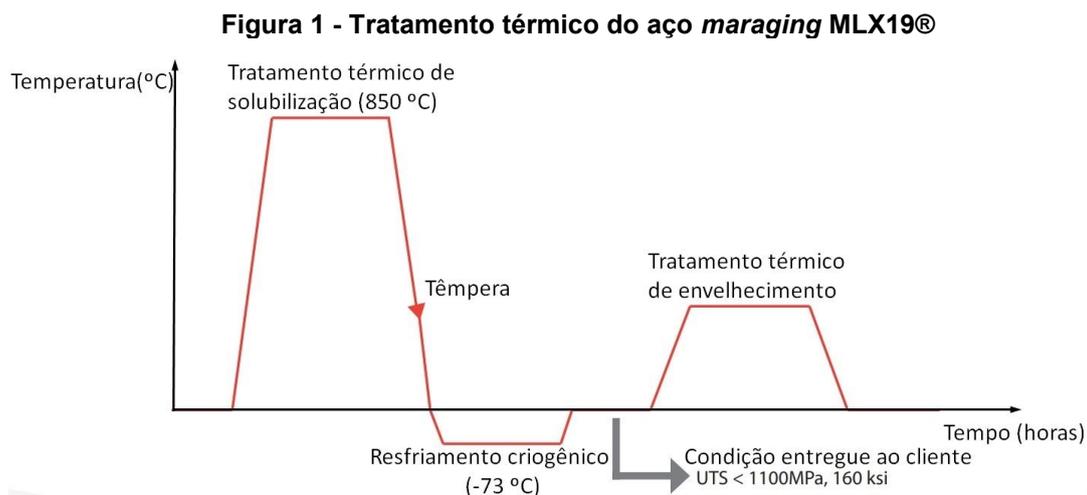
2.1.1 Aplicações dos Aços *Maraging* em Componentes Aeronáuticos e Aeroespaciais

Devido às inúmeras propriedades como a excelente relação entre resistência/peso, boa soldabilidade, alta resistência ao escoamento e a corrosão, os aços *maraging* são utilizados em aeronaves, com aplicações estruturais, no

automobilismo, no setor da defesa, em sistemas de fixação, em motores de foguetes (HALL; SLUNDER, 1968; MOURITZ, 2012).

Os aços *maraging* podem ser usinados com facilidade em função da sua baixa dureza antes do tratamento térmico, e em seguida, passam pelo processo de envelhecimento térmico antes de serem utilizados em componentes aeronáuticos. As temperaturas comumente utilizadas ficam entre 480 °C e 510 °C, sendo o tempo de tratamento de até 10 horas, e o resultado é a dispersão de precipitados na matriz martensítica. O aço *maraging* apresenta pouca precipitação de carbonetos, graças à baixa concentração de carbono na composição. O cobalto, que também pode ser utilizado como elemento de liga em aços *maraging*, reduz o limite de solubilidade do molibdênio, aumentando a fração de precipitados como o Ni_3Mo e Fe_2Mo , e outra função que possui é auxiliar na dispersão uniforme de precipitados e reduzir o tempo de envelhecimento (MOURITZ, 2012).

Segundo o fabricante AUBERT&DUVAL, o tratamento térmico utilizado para o aço *maraging* MLX19® é o de solubilização a 850 °C \pm 14 °C por 90 \pm 15 minutos, para que os átomos se dissolvam na matriz, e em seguida resfriamento em óleo ou água para têmpera do material, e na sequência resfriamento rápido a -73 °C por mais de 8 horas, para manter esses átomos dispersos na matriz. O tratamento é esquematizado na Figura 1 (AUBERT&DUVAL, 2017).



Fonte: Adaptado de Aubert&Duval (2017)

O material é entregue normalmente só temperado e pronto para ser usinado, com posterior tratamento térmico pelo cliente, ou seja, antes de passar pelo tratamento térmico de solubilização. Há também a possibilidade de fornecimento do

material envelhecido, mas devido à alta dificuldade de usinar é de pouco interesse industrial (AUBERT&DUVAL, 2017).

2.2 Produção de pós metálicos

Para fabricar uma peça por meio da manufatura aditiva, faz-se necessário o uso da matéria-prima em pó e, portanto, o tamanho e a morfologia das partículas devem ser parâmetros bem controlados. Os tamanhos de partículas normalmente utilizados variam de 15 a 45 μm se for empregada na fusão seletiva a *laser*, e de 45 a 106 μm se for utilizada a fusão por feixe de elétrons (DAWES; BOWERMAN; TREPLETON, 2015).

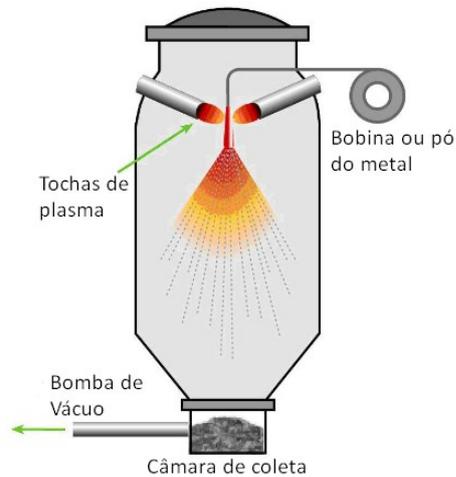
Para a fabricação de pós metálicos utilizados em aplicações de ponta, como a indústria aeroespacial, são utilizados fornos de fusão por indução a vácuo acoplado acima dos atomizadores, devido à necessidade de se controlar os elementos intersticiais que, em determinadas aplicações, devem ter um controle mais rígido (DAWES; BOWERMAN; TREPLETON, 2015).

Para a produção de pós metálicos, podem ser empregadas diversas técnicas, como por exemplo a redução do estado sólido, a eletrólise, os processos químicos, a atomização e moagem. Dentre esses métodos, os de atomização são os mais utilizados, devido às propriedades geométricas resultantes dos pós. Neles se incluem a atomização por água, atomização a plasma (PA) e a atomização a gás (GA). Além desses métodos de atomização, outro que pode ser empregado, principalmente na produção de pós de titânio, é o de hidretação-dehidretação (HDH) (DAWES; BOWERMAN; TREPLETON, 2015).

2.2.1 Atomização a Plasma (PA)

O equipamento de atomização a plasma, dependendo de sua configuração, pode ser alimentado por metal no formato de arame ou em pó. A técnica de atomização consiste em aplicar uma tocha de plasma no metal que entra na câmara e que acaba fundindo, formando pequenas gotas de metal que se solidificam e caem na câmara de coleta. A Figura 2 apresenta um esquema do processo de atomização a plasma, que resulta em partículas altamente esféricas. Este método é utilizado para produzir metais reativos de alta pureza, como ligas de titânio, em que devem ser aplicadas atmosferas inertes ou vácuo (DAWES; BOWERMAN; TREPLETON, 2015).

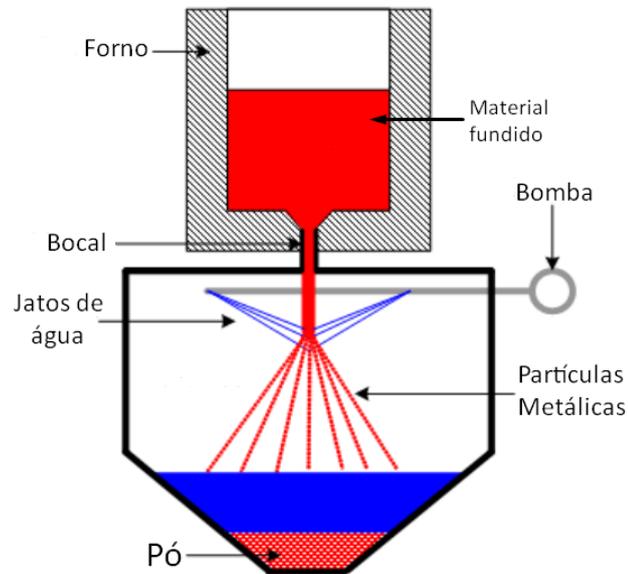
Figura 2 - Esquema representativo do processo de atomização a plasma



Fonte: Adaptado de Dawes, Bowerman e Trepleton (2015)

2.2.2 Atomização por Água

O processo de atomização por água (Figura 3) consiste em distribuir o metal fundido para um bocal, que regula a vazão do metal líquido. O metal líquido entra na câmara de atomização, e jatos de água posicionados simetricamente são incididos no metal líquido, atomizando e solidificando as partículas. O pó obtido é então depositado em um reservatório no fundo do equipamento. Esse método resulta em pós com baixa compactação e pouca fluidez, devido aos tamanhos e formatos altamente irregulares das partículas criadas. Eles também necessitam de processamentos posteriores para diminuir a umidade. Geralmente, são utilizados para sinterização e prensagem. As principais matérias-primas produzidas são os pós de aços e ferro (DAWES; BOWERMAN; TREPLETON, 2015).

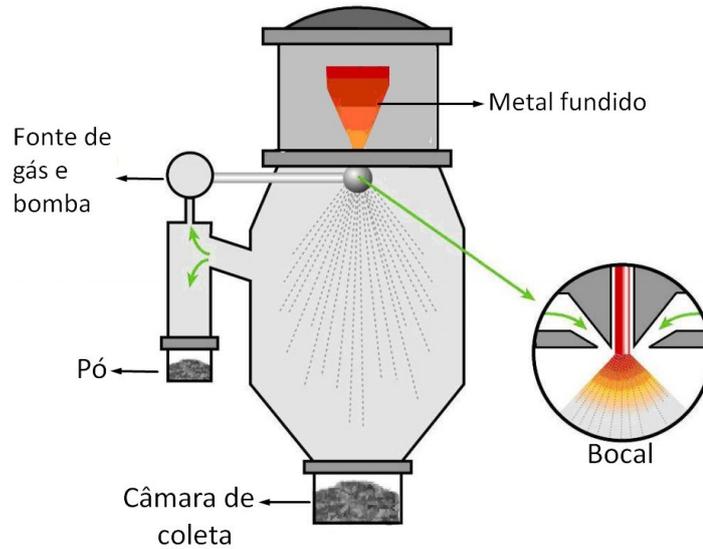
Figura 3 - Esquema representativo do processo de atomização por água

Fonte: Adaptado de Kopeliovich (2012)

2.2.3 Atomização a Gás (GA)

A técnica de atomização a gás é muito semelhante com a atomização por água, partindo de um banho de metal fundido, que é forçado a passar por um bico de tamanho muito pequeno, formando pequenas partículas que acabam se desintegrando por jatos de gás de alta pressão. Esses jatos solidificam o material formando partículas mais esféricas, devido à menor capacidade de dispersão do calor dos gases, que dão maior tempo para sua solidificação. As partículas são então recolhidas no final do processo. Na Figura 4 é mostrado um esquema ilustrativo do processo de atomização a gás (DAWES; BOWERMAN; TREPLETON, 2015).

Figura 4 - Esquema representativo do funcionamento do processo de atomização a gás



Fonte: Adaptado de Dawes, Bowerman e Trepleton (2015)

2.2.4 Hidratação-Dehidratação (HDH)

O processo de hidratação-dehidratação difere dos demais apresentados anteriormente, pois nele não há necessidade de fundir o material. Nesse método ocorre a trituração, moagem, peneiramento e separação de partículas. O processo considera a natureza de alguns materiais, como no caso do titânio, que quando exposto a hidrogênio e calor, ele se fragiliza. O material então é triturado e separado em tamanhos de partículas, e o pó resultante passa por um processo para remover o excesso de hidrogênio. Nesse tipo de fabricação de pós, as partículas resultantes são irregulares e podem ser utilizadas ou servem como matéria-prima para o atomizador a plasma (DAWES; BOWERMAN; TREPLETON, 2015).

2.2.5 Variáveis de Processos

As características dos pós metálicos, como o formato esférico e o tamanho das partículas, terão grande impacto nas características e propriedades finais de componentes fabricados via manufatura aditiva, como, por exemplo na densidade das peças, acabamento superficial e propriedades mecânicas. Esses fatores podem ser afetados pois, durante a fabricação desses componentes, o pó é espalhado como uma fina camada, e se houver partículas não homogêneas, pode resultar em porosidades,

devido à falta de partículas em determinado lugar, ou ainda, ocorrer a fusão incompleta devida à grande espessura da camada de pó. Estes fatos acabam encarecendo o processo de manufatura aditiva, pois apenas métodos mais caros conseguem alcançar os níveis de qualidade requeridos por esse processo. Na Tabela 2 são mostrados os processos de fabricação e as principais características de cada método (DAWES; BOWERMAN; TREPLETEON, 2015).

Tabela 2 - Características do pó metálico em função do seu processo de fabricação

Processo de fabricação	Tamanho de partícula (µm)	Vantagens	Desvantagens	Usos comuns
Atomização por água	0-500	<ul style="list-style-type: none"> Alto rendimento Requer apenas matéria-prima na forma de lingotes Ampla gama de tamanhos 	<ul style="list-style-type: none"> Requer processamento posterior para remover água Morfologia de partículas irregular Baixo rendimento de partículas de tamanho 20-150µm 	Metais não reativos
Atomização a gás	0-500	<ul style="list-style-type: none"> Ampla gama de ligas disponíveis Pode ser utilizada em ligas reativas Requer apenas matéria-prima em forma de lingotes Alto rendimento Ampla gama de tamanhos Partículas esféricas 	<ul style="list-style-type: none"> Baixo rendimento de partículas entre 20-150µm 	Ni, Co, Fe, Al
Atomização à plasma	0-200	<ul style="list-style-type: none"> Partículas extremamente esféricas 	<ul style="list-style-type: none"> Necessita de matéria-prima por lingotes ou na forma de pó Alto custo 	Ti
Hidretação-dehidretação	45-500	<ul style="list-style-type: none"> Baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> Morfologia de partícula irregular Alto conteúdo intersticial (H, O) 	Ti

Fonte: Adaptado de Dawes, Bowerman e Trepleton (2015)

2.3 Manufatura aditiva de metais

A manufatura aditiva é uma tecnologia que vem se desenvolvendo e cada vez mais utilizada na indústria de manufatura, embora seja conhecida popularmente por impressão tridimensional (3D) ou prototipagem rápida. Segundo a ABNT (2018, p. 07), a manufatura aditiva é o processo de união de materiais para obtenção de peças a partir de dados de modelos 3D, geralmente camada por camada, diferentemente das metodologias de manufaturas subtrativa como, por exemplo a usinagem e a manufatura formativa, como a fundição (BANDYOPADHYAY; BOSE, 2016).

Uma vez fabricada por manufatura aditiva, a peça pode ser utilizada para modelos de concepção, como protótipos funcionais ou, ainda, utilizadas na prática. No entanto, com os novos desenvolvimentos e barateamento da tecnologia de manufatura aditiva, e com a sua industrialização em larga escala, será viável a produção de várias peças simultaneamente, assim como alterar peças já existentes de forma mais fácil. A manufatura aditiva se tornará um processo muito mais democrático, podendo qualquer pessoa contribuir com o seu *design* e testar em qualquer lugar do mundo (BANDYOPADHYAY; BOSE, 2016).

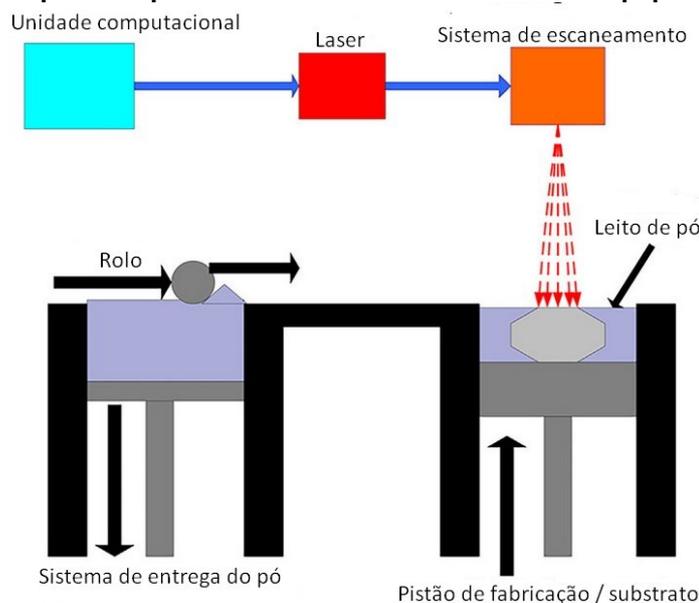
2.3.1 Desenvolvimento da Primeira Tecnologia de Impressão 3D de Metais

A primeira tecnologia de impressão 3D que resultaria mais tarde na utilização de impressão de metais começou na impressão de polímeros, inicialmente desenvolvida em 1984 por Carl Deckard, um estudante de graduação, e pelo Dr. Joe Beaman, um professor assistente, ambos da Universidade do Texas, em Austin (DAVIES, 2020). Os dois pesquisadores estavam trabalhando em uma nova tecnologia conhecida como sinterização seletiva a *laser*, em inglês *selective laser sintering* (SLS). Essa técnica consiste em fundir o pó de polímeros em certas áreas utilizando um *laser*, e em seguida outra camada de pó é distribuída sobre a camada anterior, e novamente o *laser* atua fundindo o material. Esse processo é repetido até que a peça seja produzida totalmente. Deckard e Beaman trabalharam nessa nova técnica de 1984 até 1986, quando desenvolveram totalmente a tecnologia e criaram uma empresa chamada Nova Automation, que posteriormente se transformou na DTM Corporation; em 1989 construíram duas máquinas que chamaram de Mod A e Mod B e quatro modelos 125s (BANDYOPADHYAY; BOSE, 2016).

2.3.2 Sinterização Direta de Metal a *Laser*

Em 1989 o Dr. Hans J. Langer e Dr. Hans Steinbichler criaram uma empresa chamada de EOS e começaram a trabalhar com impressão de peças plásticas utilizando o mesmo sistema SLS desenvolvidos por Deckard e Beaman. Um ano mais tarde, em 1990, começaram pesquisas para fazer o primeiro protótipo de máquina de sinterização de metais, que foi lançada em 1994. No ano seguinte, lançaram a primeira máquina de sistema *Direct Laser Metal Sintering* (DMLS). O equipamento funcionou muito bem e poderia ser utilizado em diversos metais, como o alumínio, cobalto, níquel, aço inoxidável e ligas de titânio, funcionando essencialmente da mesma forma que o SLS, porém, sinterizando pós metálicos. Seu funcionamento baseia-se na sinterização de uma camada de pó metálico com posterior depósito de mais uma camada de pó, por meio de um rolo, ocorrendo uma nova sinterização, e assim sucessivamente, até que a peça seja completamente formada, como mostrado na Figura 5. Esse método é bem semelhante ao de fusão seletiva a *laser*, no entanto, o pó que passa pela sinterização direta de metal a *laser* é apenas sinterizado, ou seja, não ocorre a fusão, enquanto que no método de fusão seletiva a *laser* o pó é fundido. Em 1997 eles venderam parte da empresa e focaram nos métodos de sinterização a *laser*. Desde então a empresa tornou-se uma das mais competitivas e bem-sucedidas na área de manufatura aditiva (BANDYOPADHYAY; BOSE, 2016).

Figura 5 - Esquema representativo do funcionamento do equipamento DMLS

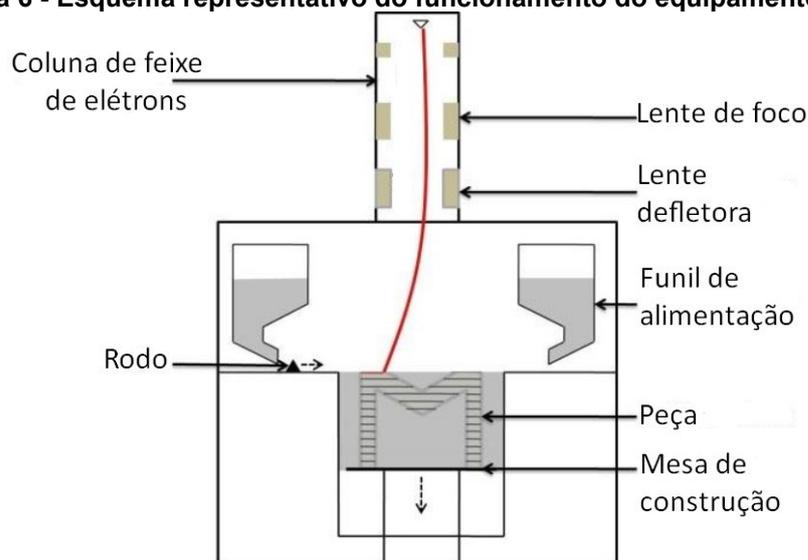


Fonte: Adaptado de Panda e Sahoo (2019)

2.3.3 Fusão por Feixe de Elétrons

Outra tecnologia de manufatura aditiva que também foi desenvolvida na mesma época é chamada de *Electron beam melting* (EBM), em português fusão por feixe de elétrons, pela companhia Arcam AB. A tecnologia funciona por meio da emissão de um feixe de elétrons em um leito de pó, em determinadas regiões. Quando o pó é fundido, uma nova camada de pó é colocada sobre a anterior e novamente um feixe de elétrons é emitido, e, com isso, o processo se repete até que toda a peça seja impressa. Na Figura 8 tem-se uma representação do processo. A empresa responsável trabalhou em conjunto com a Universidade de Tecnologia de Chalmer e vendeu as suas primeiras máquinas utilizando tecnologia de feixe de elétrons para dois clientes em 2002 (BANDYOPADHYAY; BOSE, 2016).

Figura 6 - Esquema representativo do funcionamento do equipamento EBM



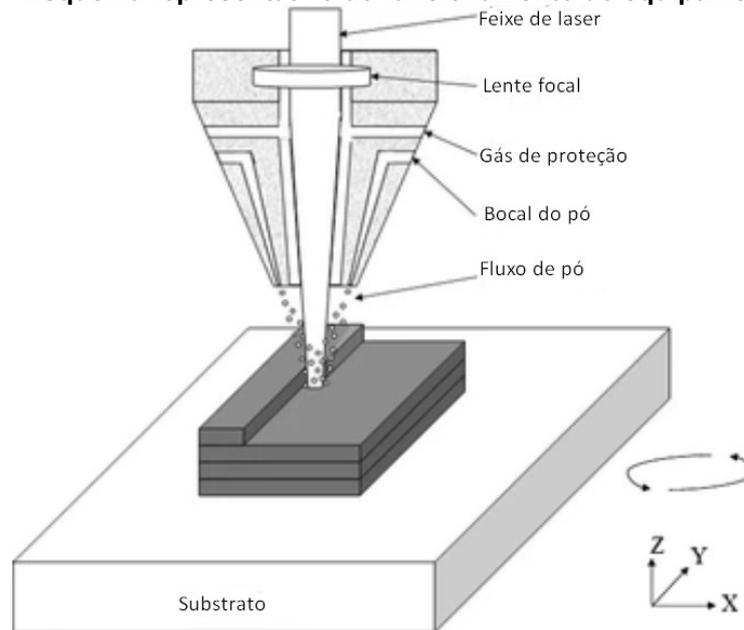
Fonte: Adaptado de Suard (2014)

2.3.4 Conformação Próxima ao Formato Final via *Laser*

Na mesma época uma outra tecnologia de manufatura aditiva estava sendo desenvolvida por uma empresa chamada Sandia National Laboratories, em Albuquerque, Novo México nos Estados Unidos, denominada de *Laser engineered net shaping* (LENS). O equipamento consiste de uma base e de um cabeçote móveis. A diferença dessa técnica está em como o pó é adicionado. Enquanto na técnica SLS o material é adicionado na base por rolos, no método de conformação próxima ao formato final via *laser*, o pó é adicionado por bicos próximos ao *laser* que fundem o

material e o deposita na superfície do substrato, como mostrado na Figura 6. A tecnologia foi desenvolvida em 1997 e teve a primeira máquina comercializada pela Optomec em 1998 (BANDYOPADHYAY; BOSE, 2016).

Figura 7 - Esquema representativo do funcionamento do equipamento LENS

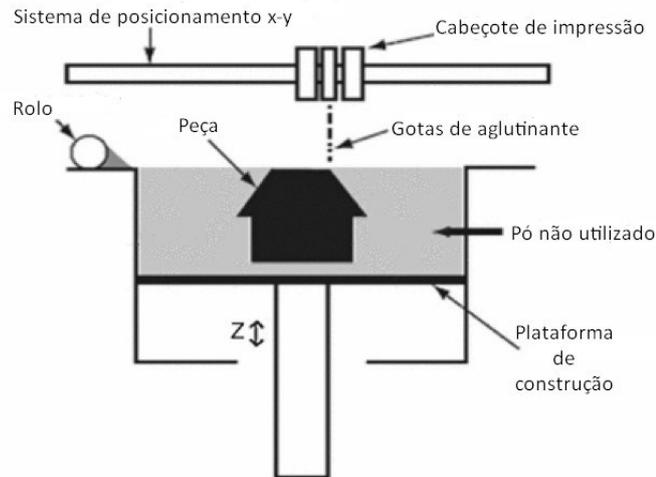


Fonte: Adaptado de Zhang et. al (2017)

2.3.5 Jato de Aglutinante

Também nos anos 90, a tecnologia de *Binder jetting* foi desenvolvida no MIT pelo Professor Emanuel Sachs. Tal método consiste em depositar um aglutinante na superfície do leito de pó, em seguida uma nova camada de pó é depositada e o processo se repete sucessivamente até a formação da peça. Posteriormente, a peça é aquecida para eliminar alguns ligantes e consolidar o pó. A Figura 7 ilustra o esquema do funcionamento do equipamento (GIBSON, 2015).

Figura 8 - Esquema representativo do funcionamento do equipamento de *Binder jetting*

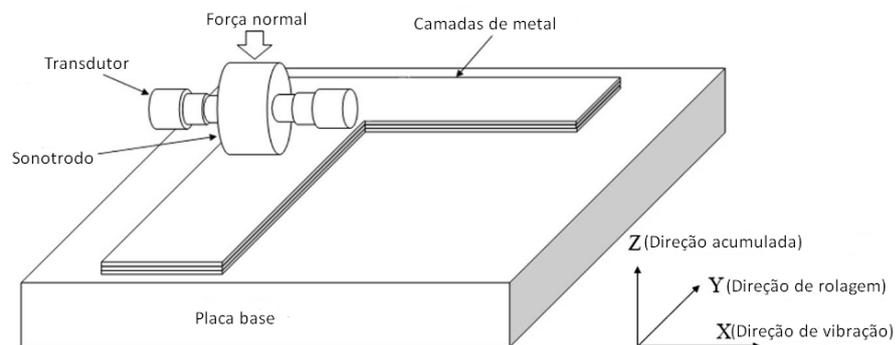


Fonte: Adaptado de Silbernagel (2018)

2.3.6 Laminação por Camadas

O processo de laminação por camadas foi desenvolvido por uma empresa chamada Helisys e em 1991 começaram a desenvolver equipamentos. O método consiste em utilizar como matéria-prima folhas de metal sobrepostas e uma fonte de energia, que comumente é ultrassônica ou *laser*, para unir essas folhas. Na Figura 9 é mostrado um esquema do funcionamento do processo (ZHANG et al., 2017; SILBERNAGEL, 2018).

Figura 9 - Esquema representativo do funcionamento do equipamento de laminação por camadas



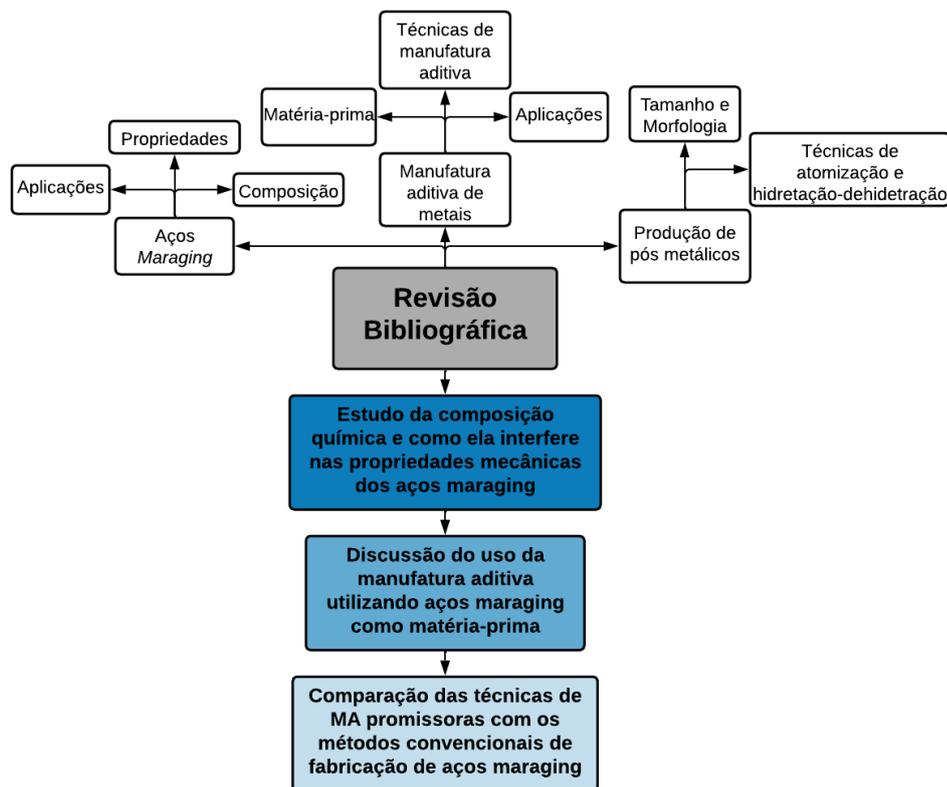
Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2017)

3 METODOLOGIA

Por se tratar de um estudo teórico, inicialmente realizou-se uma revisão bibliográfica sobre os aços *maraging* e a manufatura aditiva em metais, com o intuito de centralizar informações pertinentes ao tema, de diversas referências e pontos de vista, que possibilitem uma abordagem nova para gerar novas conclusões acerca do assunto.

Essa revisão bibliográfica teve como base livros, artigos, dissertações, teses e documentos técnicos da área. No fluxograma apresentado na Figura 10 tem-se um esquema de como o trabalho foi conduzido para que os objetivos propostos fossem atingidos.

Figura 10 - Fluxograma da metodologia de estudo



Fonte: Autoria própria (2022)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A possibilidade de fabricação de componentes de aços *maraging* via manufatura aditiva a partir de diferentes técnicas é muito importante para a indústria, e pode em alguns casos baratear o processo produtivo, além de oferecer novos benefícios. Essas técnicas podem influenciar na microestrutura e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas de componentes. Por isso, é interessante conhecer e comparar o material fabricado por processos convencionais com o fabricado por manufatura aditiva, compreendendo como o material se comportará para aprimorar os parâmetros de processo e aumentar a possibilidade de utilização dessas técnicas.

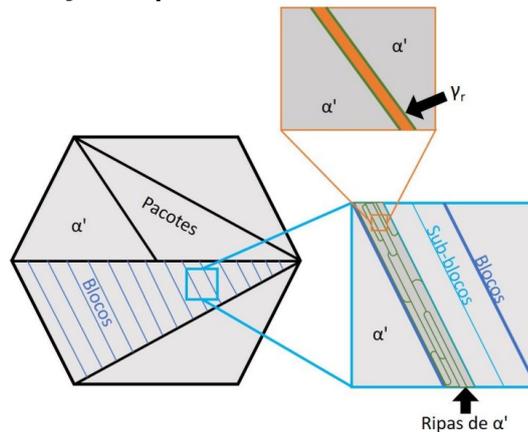
O uso do método de sinterização direta de metal a *laser* já está sendo testado e se mostra promissor. A possível utilização de outros métodos de manufatura aditiva utilizando aços *maraging* como matéria-prima serão discutidos nos tópicos seguintes.

4.1 Microestrutura e Propriedades Mecânicas dos Aços *Maraging*

A microestrutura presente nos aços *maraging* e a presença dos precipitados intermetálicos são os responsáveis pelas excelentes propriedades mecânicas apresentadas. Para garantir tais características, é necessário um controle composicional, além de um bom processo de tratamento térmico, que no caso dos aços *maraging* são de solubilização e de envelhecimento.

Os aços *maraging* apresentam uma composição de aproximadamente 18% de níquel; 3,3 a 5% de molibdênio; 8,5 a 12,5% de cobalto; 0,2 a 1,6% de titânio e 0,1% de alumínio. A fase presente após o aquecimento a temperaturas acima de 815 °C é a austenita, e após o resfriamento, por exemplo ao ar, torna-se martensita. A matriz martensítica (α') é organizada em ripas, que estão dentro de blocos, os quais estão dentro de pacotes. A austenita revertida (γ_r) aparece entre as ripas de martensita. Na Figura 11 tem-se uma representação da estrutura dos aços *maraging* (FEITOSA, 2020).

Figura 11 - Representação esquemática das microestruturas de aços *maraging*

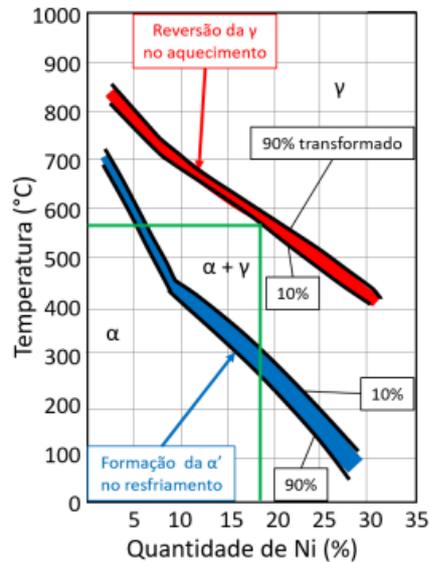


Fonte: Feitosa (2020)

As ripas de martensita apresentam alta densidade de discordância propiciando locais em que ocorrerá nucleação de precipitados finos durante o envelhecimento, sendo eles: Ni_3Mo , Ni_3Ti , Fe_2Mo , $FeMo$, Fe_7Mo_6 , $FeTi$, Fe_2Ti . Segundo Weiss (1984), estudos de MEV e de medição de resistividade elétrica sugerem que a presença de cobalto resulta em uma dispersão de precipitados mais fina contendo molibdênio e auxilia na dispersão uniforme de precipitados, reduzindo o tempo de envelhecimento.

Durante o tratamento térmico de envelhecimento, pode ocorrer o superenvelhecimento, que se caracteriza pelo coalescimento dos precipitados e principalmente, pela reversão da martensita em austenita, o que leva à diminuição da dureza, sendo o último mais crítico. Segundo Li (1995), essa reversão ocorre, devido à temperatura do tratamento de envelhecimento que é geralmente feita de 455 °C a 510 °C, e quando a temperatura fica entre 500 °C e 700 °C, propicia a dissolução de precipitados ricos em níquel na matriz martensítica, aumentando o teor local, e conseqüentemente, revertendo-a em austenita. Na Figura 12 é possível observar que em temperaturas acima de 550 °C.

Figura 12 - Diagrama do níquel metaestável, apresentando três campos de fases: γ (austenita); $\gamma + \alpha$; e α . Linha verde indicando 18% de níquel



Fonte: Feitosa (2020)

As propriedades mecânicas estão intimamente relacionadas à composição e microestrutura dos aços *maraging*. Na Tabela 3 são mostradas as propriedades dos aços *maraging* solubilizados a 815 °C por 1 hora. O aço *maraging* 350 é o que apresenta maior concentração de cobalto, em torno de 12,5% e, como discutido anteriormente, essa maior concentração se reflete no aumento da tensão de escoamento e de limite de resistência.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos aços *maraging* 200, 250, 300 e 350 solubilizados a 815 °C por 1 hora e resfriamento ao ar

Série	Tensão de escoamento	Limite de Resistência	Alongamento	Redução na área
	MPa	MPa	%	%
200	1400	1500	10	60
250	1700	1800	8	55
300	2000	2050	7	40
350	2400	2450	6	25

Fonte: Adaptado de Schmidt e Rohrbach (2014)

Segundo Weiss (1984), a resistência a fadiga dos aços *maraging* são semelhantes às dos aços de alta liga e podem ser otimizadas por processos termoquímicos, como a nitretação, e por processos mecânicos como o *shot peening*. Em termos de propagação de trincas, os aços *maraging* podem tolerar cargas maiores sem sofrer propagação de trincas.

A proposta do presente trabalho é discutir a possibilidade de fabricação de aços *maraging* via a manufatura aditiva. Esses novos métodos via manufatura aditiva apresentam diferenças em relação aos processos convencionais, como por exemplo, a sinterização direta de metal a *laser* que tem como matéria-prima o pó, o qual apresenta diversos elementos de liga e é necessária uma padronização de tamanhos e morfologia das partículas, além do controle das variáveis de processo, como velocidade e potência do *laser*, direção de sinterização, espessura de camada do pó e espaçamento de hachura. O uso desses novos métodos assim como suas implicações serão discutidos no tópico seguinte.

4.2 Manufatura Aditiva de Aços *Maraging*

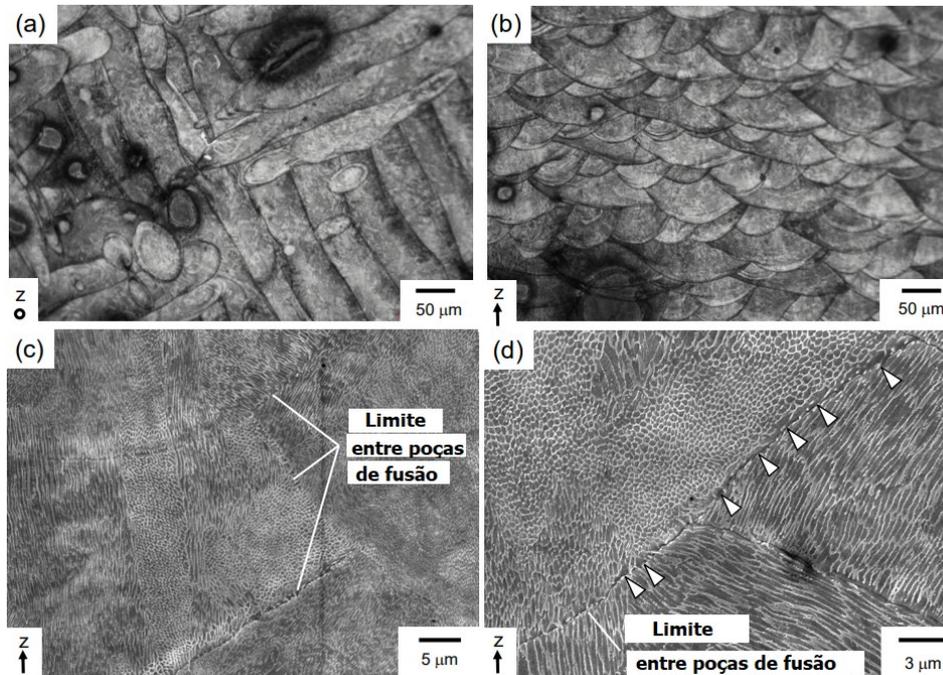
Diversos estudos foram realizados a fim de avaliar o uso dos aços *maraging* como matéria-prima na manufatura aditiva. Com base nisso, foram selecionados os cinco métodos mais utilizados pela indústria, aplicados a diversos materiais, incluindo cerâmicas e polímeros. No caso dos metais, são utilizados em ligas não ferrosas como aços ferramentas, aços inoxidáveis e aços comuns e, também, podem ser utilizados em materiais não ferrosos como bronze, cobalto-cromo, alumínio, titânio entre outros. A seguir serão discutidos como esses estudos para aços *maraging* foram realizados e suas respectivas conclusões.

4.2.1 Sinterização Direta de Metal a *Laser*

A técnica de sinterização direta de metal a *laser* é a mais aplicada nas pesquisas que utilizam como matéria-prima os aços *maraging*. Em um desses estudos, Takata et al. (2018) investigaram a microestrutura dos aços *maraging* utilizando e verificaram que a amostra exibiu, devido à sinterização local, poças de fusão que se solidificaram rapidamente. A maior parte dessas poças apresentaram matriz α , uma estrutura martensítica em ripas com alta densidade de discordâncias. Porém, devido à maior taxa de resfriamento próxima das interfaces líquido-sólido nas regiões irradiadas, ocorreu a formação de austenita retida no limite dessa interface e comprovou-se, ainda, que, independentemente da direção de fabricação, ocorria a sua formação. A austenita retida propicia um aumento na ductilidade do material, uma vez que a fratura ocorre preferencialmente ao longo dos limites das poças de fusão.

Na Figura 13, é possível observar a microestrutura do aço *maraging* fabricado por SLM e o limite entre peças de fusão.

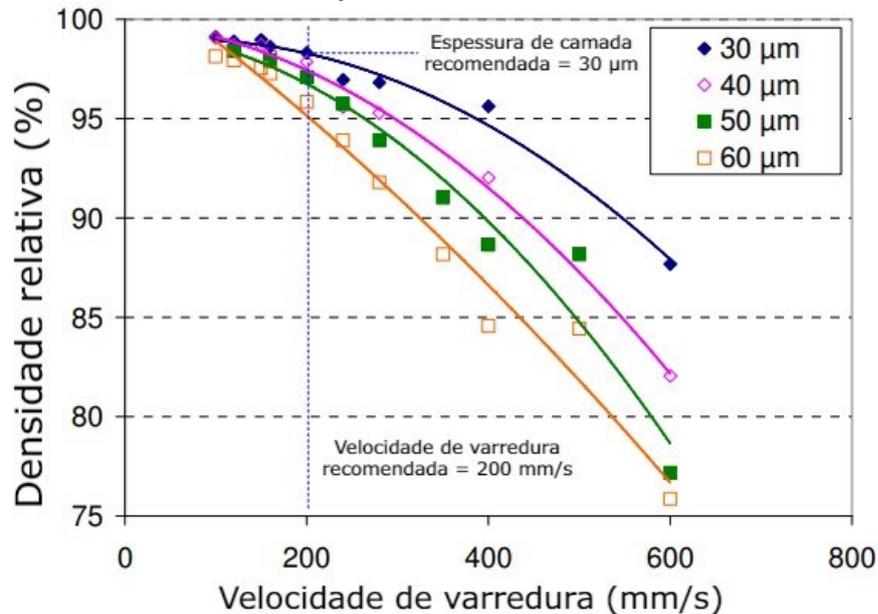
Figura 13 – (a,b) Micrografias ópticas, (c,d) imagens de TEM mostrando a microestrutura do aço *maraging* fabricado por SLM em fusão de leito em pó



Fonte: Adaptado de Takata et. al (2018)

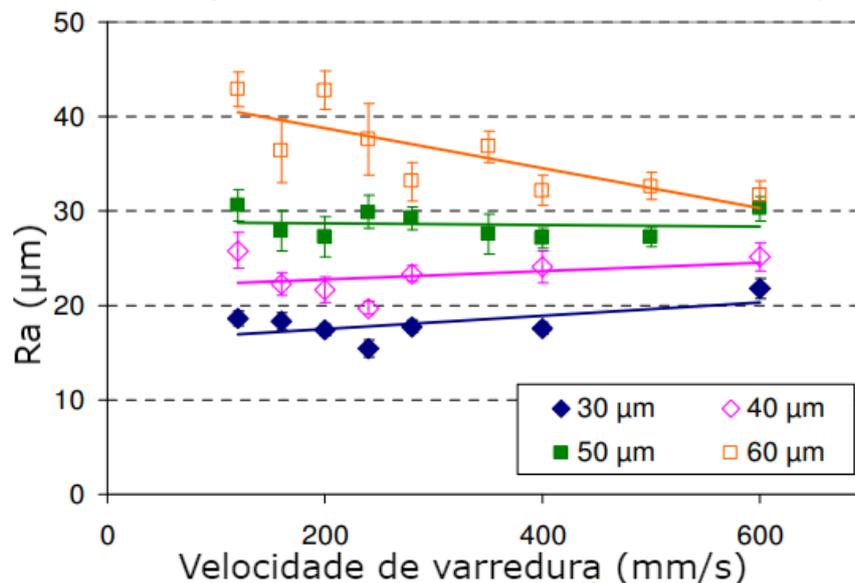
Yasa, Kempen e Kruth (2010), em outro estudo, analisaram a microestrutura e as propriedades mecânicas, e constataram que o aumento da velocidade de varredura e da espessura da camada diminuem a densidade relativa da amostra fabricada, como pode ser observado na Figura 14, que compara variáveis do processo. Essa diminuição é explicada em função de uma maior velocidade sob uma camada mais grossa ter densidade de energia fornecida menor, ou seja, a sinterização na área superficial é diminuída. Essa densidade de energia também afeta a rugosidade da superfície da amostra, como pode ser observado na Figura 15, a qual compara as diferentes variáveis do processo.

Figura 14 – Densidade relativa versus velocidade de varredura para diferentes valores de espessura de camada



Fonte: Adaptado de Yasa, Kempen e Kruth (2010)

Figura 15 - Valores de rugosidade média medidos na superfície versus velocidade de varredura para diferentes espessuras de camadas com intervalo de confiança de 95%

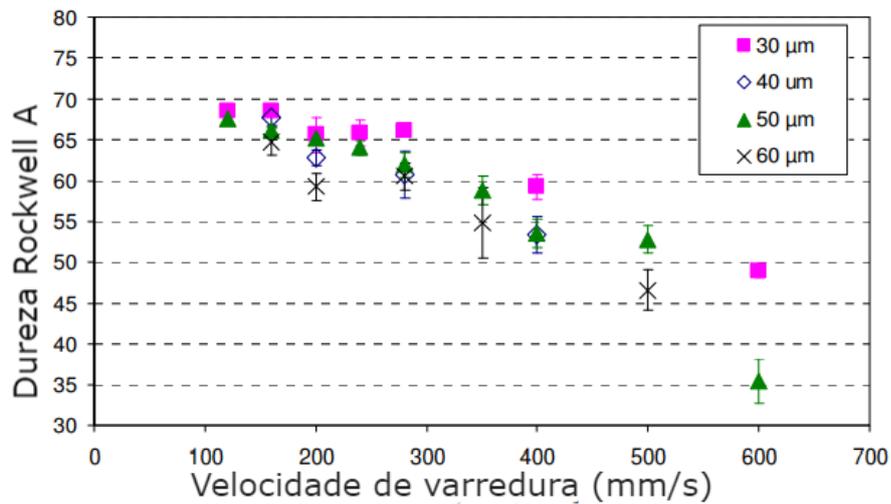


Fonte: Adaptado de Yasa, Kempen e Kruth (2010)

Ainda no estudo de Yasa, Kempen e Kruth (2010), foi investigada a dureza na escala macro e micro. Foram feitas seções transversais nas laterais dos corpos-de-prova e feitas medidas de dureza nessas superfícies. As macrodurezas foram realizadas considerando a porosidade do material, enquanto a microdureza foi realizada para analisar a influência dos diferentes parâmetros do processo. Os

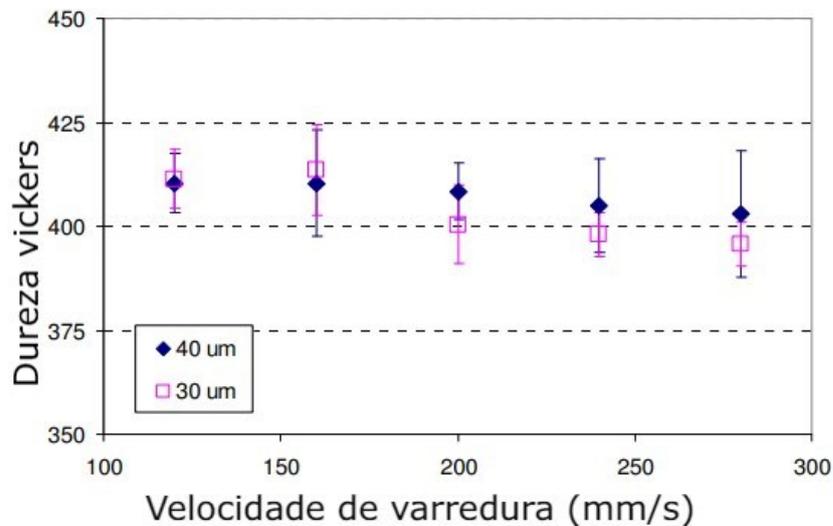
resultados de macrodureza são apresentados na Figura 16, que mostra que o aumento da velocidade de varredura diminui a densidade e, conseqüentemente, diminui a dureza, fenômeno já observado na Figura 14, que correlaciona maior energia fornecida em determinada área com o aumento da densidade relativa. Concluiu-se, a partir dos resultados dos testes de microdureza, que os parâmetros do processo não afetam a microdureza Vickers da amostra, como apresentado na Figura 17, que compara as variáveis de processo.

Figura 16 - Dureza média medida em seções transversais versus velocidade de varredura para diferentes espessuras de camadas com 95% de intervalo de confiança



Fonte: Adaptado de Yasa, Kempen e Kruth (2010)

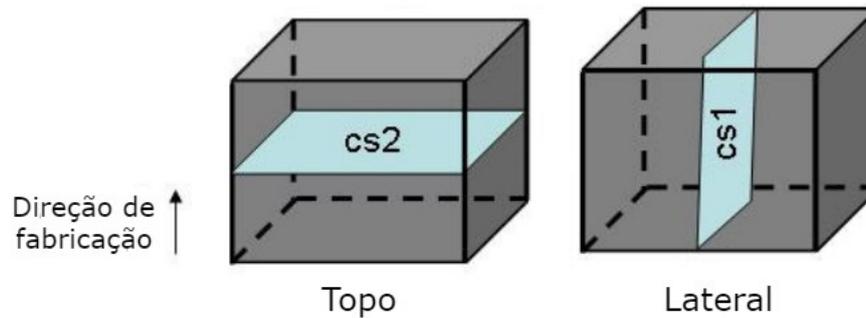
Figura 17 - Microdureza média das seções transversais versus velocidade de varredura para diferentes espessuras de camadas com 95% de intervalo de confiança



Fonte: Adaptado de Yasa, Kempen e Kruth (2010)

Em outra parte do estudo foi analisada a microestrutura das amostras fabricadas, tanto nas superfícies de corte na transversal como na longitudinal conforme ilustrado na Figura 18 (YASA et al., 2010).

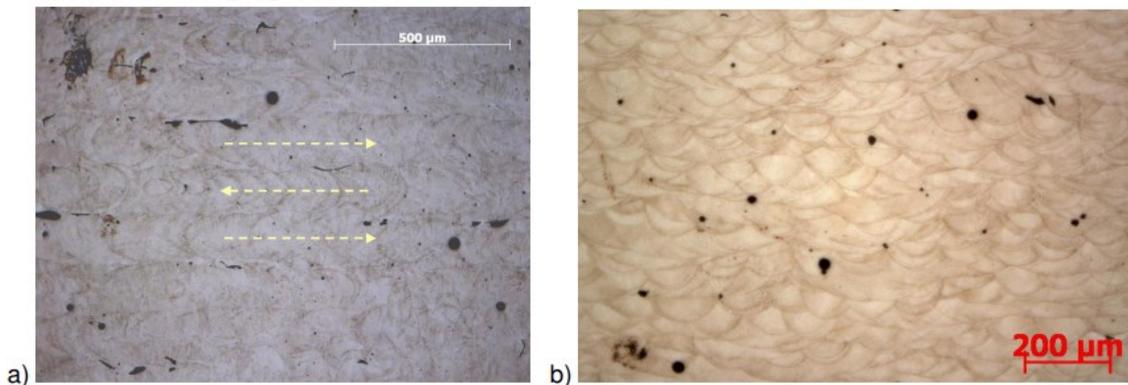
Figura 18 - Ilustração das seções de cortes transversais e longitudinal com o respectivo eixo de fabricação



Fonte: Adaptado de Yasa, Kempen e Kruth (2010)

Na Figura 19a, na amostra fabricada com espessura de camada de 60 μm e velocidade de varredura de 120 mm/s, foram visualizadas as trilhas de varredura bidirecionais, apontadas pelas setas, além de poros (pontos pretos). Nota-se, também, que a maioria dos poros irregulares estão nas bordas das trilhas de varredura e têm formato variado. Na Figura 19b, têm-se a amostra fabricada com espessura de camada de 30 μm e com velocidade de varredura de 150 mm/s, observa-se a direção da varredura perpendicular à seção, e também é possível medir a profundidade da poça de fusão que tem 80-90 μm (Yasa, Kempen e Kruth, 2010).

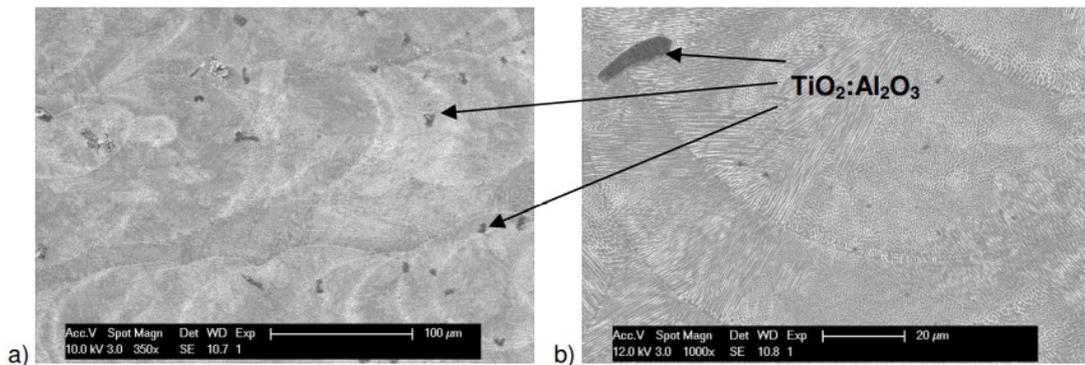
Figura 19 - Micrografia após ataque químico a) topo-cs2 b) lateral-cs1 de uma amostra de aço *maraging* fabricada utilizando sinterização direta de metal a laser



Fonte: Adaptado de Yasa, Kempen e Kruth (2010)

As imagens obtidas por MEV são mostradas na Figura 20. Na Figura 20a, é possível observar as trilhas de varredura bidirecionais e, na Figura 20b, a morfologia celular/dendrítica e crescimento epitaxial. Nas micrografias, nota-se também a presença de inclusões de TiO_2 e Al_2O_3 , que comprometem as propriedades mecânicas. Como forma de melhorar as propriedades, principalmente a macrodureza, foi realizada a refusão a *laser* camada a camada, que consiste de uma nova aplicação de *laser* na camada já formada, a fim de aumentar a densidade relativa. Após sua aplicação, os corpos-de-prova apresentaram menor porosidade (Yasa, Kempen e Kruth, 2010).

Figura 20 - Microscopia eletrônica de varredura a) topo-cs2 b) lateral-cs1 de uma amostra de aço *maraging* fabricada utilizando sinterização direta de metal a *laser*

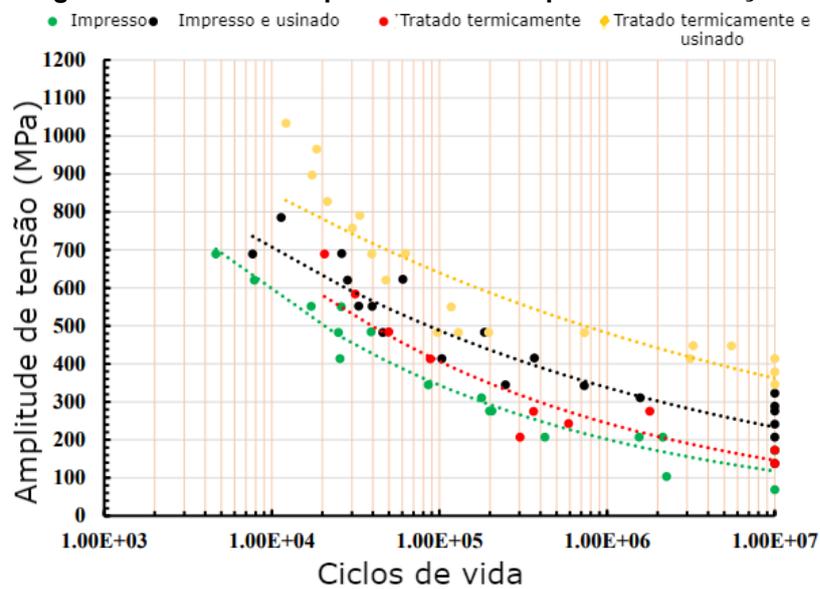


Fonte: Adaptado de Yasa, Kempen e Kruth (2010)

Raju e Rosen (2021) analisaram a fadiga dos aços *maraging* obtidos por SLM. Foram feitas análises de corpos-de-prova em 4 condições: como impresso; impresso e usinado; tratado termicamente; tratado termicamente e usinado. Foram impressos também corpos de provas na direção *x* e na direção *y*, e os resultados mostraram que a impressão na direção *x* foi melhor que a direção *y* devido à anisotropia do processo de fusão em leito de pó, ou seja, dependendo da direção de fabricação os esforços constantes de tração e compressão da fadiga se tornam críticos, principalmente quando as trilhas de varredura são perpendiculares aos esforços de fadiga. Os resultados menos satisfatórios foram dos corpos-de-prova como impressos, enquanto os melhores foram os que passaram por tratamento térmico e usinagem, como observado nas Figuras 21 e 22, que correspondem às curvas de S-N nas duas direções *x* e *y*, respectivamente. Constataram também que a amostra tratada termicamente não teve valores acima da impressa e usinada. Isso se deve ao fato de que, durante o tratamento térmico, ocorre a redução da ductilidade, a qual reduz a

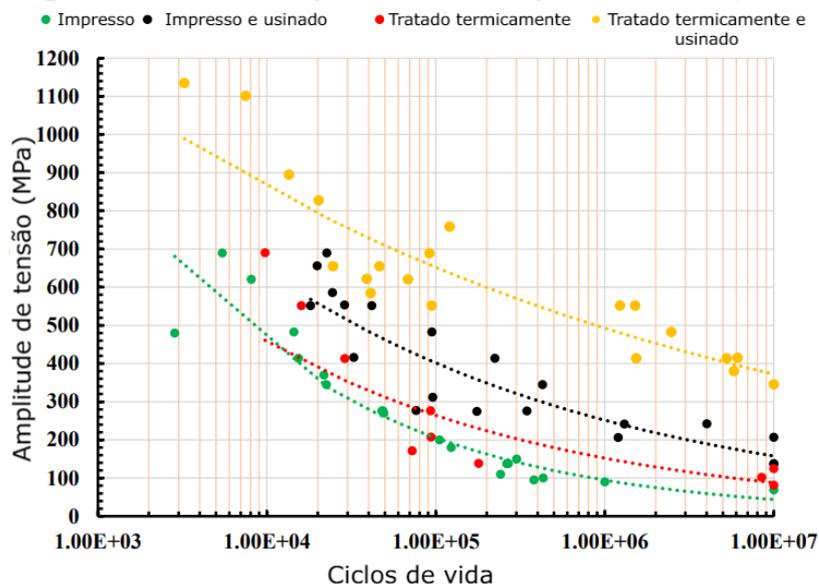
vida em fadiga da amostra. Por outro lado, na amostra tratada termicamente e usinada, ambos os processos combinados aumentam a resistência e diminuem a porosidade e a rugosidade superficial, garantindo uma boa resistência a fadiga. Em comparação com valores de amplitude de tensão do trabalho de Kawagoishi et al. (2014), que estudou a melhoria da fadiga pela da técnica de *shot peening* os resultados dos corpos-de-prova de aços *maraging* obtidos por SLM apresentaram menor amplitude.

Figura 21 - Curvas S-N para amostras impressas na direção x



Fonte: Adaptado de Raju e Rosen (2021)

Figura 22 - Curvas S-N para amostras impressas na direção z



Fonte: Adaptado de Raju e Rosen (2021)

Outro estudo feito por Apparao e Raju (2020) analisou os dados obtidos de ensaio de tração e de impacto. Para ensaio de tração foram fabricadas quatro amostras utilizando a técnicas de SLM, sendo duas delas tratadas termicamente e as outras duas testadas como impressas. Os resultados estão na Tabela 4. As amostras tratadas termicamente tiveram valor de limite de resistência acima das como impressas. Nos resultados observados na Tabela 5, referentes ao ensaio de impacto, ficou evidente que o tratamento térmico reduziu a tenacidade das amostras, ou seja, menos energia é necessária para quebrar a amostra. Em comparação com valores de referência da literatura, os valores de limite de resistência da amostra tratada termicamente são bem semelhantes aos obtidos nesse estudo.

Tabela 4 - Propriedades de tração das amostras de aço *maraging* como impressas e tratadas termicamente

	Carga Máxima (kN)	Carga na ruptura (kN)	Carga a 2% de deformação (kN)	Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento(0,2%) (MPa)	Limite de deformação (0,2%) (mm/mm)
Amostra 1 – Como impressa	29,23	19,42	16,13	1217,93	478,48	0,01088
Amostra 2 – Como impressa	30,33	20,50	17,05	1263,67	518,37	0,01079
Amostra 1 – Tratada termicamente	52,69	50,50	16,88	2195,42	469	0.00942
Amostra 2 – Tratada termicamente	52,23	50,00	22,55	2176,12	751,20	0,01404

Fonte: Adaptado de Apparao e Raju (2020)

Tabela 5 - Energia absorvida de amostras de aço *maraging* como impressas e tratadas termicamente

	Energia absorvida (J)	Resistência friccional do ar (J)	Energia real absorvida (J)
Amostra 1 – Como impressa	40	6	34
Amostra 2 – Como impressa	40	6	34
Amostra 1 – Tratada termicamente	10	6	4
Amostra 2 – Tratada termicamente	10	6	4

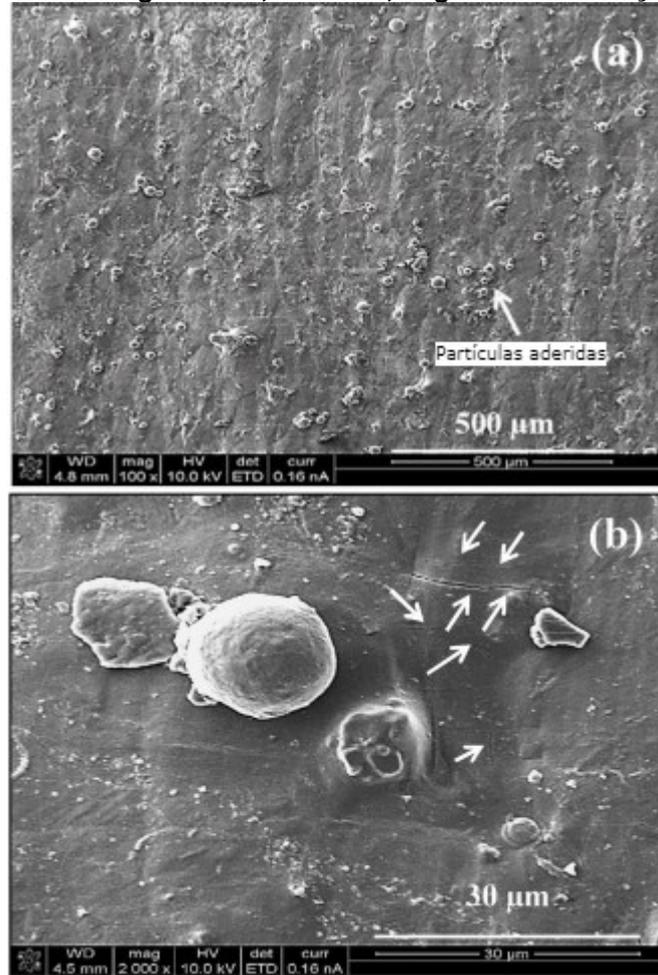
Fonte: Adaptado de Apparao e Raju (2020)

Sendo assim, a técnica de SLM para fabricação de aço *maraging* é a que apresenta maior número de estudos, e que, apesar de alguns pontos negativos, possui uma alta possibilidade de uso no futuro. Os problemas mais relatados provenientes da técnica para aços *maraging* foram a baixa qualidade superficial, devido a uma rugosidade excessiva, e baixa densidade relativa, que pode ser atenuada utilizando refusão a *laser* após cada camada. Outro problema se refere à presença da austenita retida na interface líquido-sólido, que pode diminuir significativamente a resistência ao impacto, não sendo apontada uma possível solução para este caso.

4.2.2 Fusão por Feixe de Elétrons

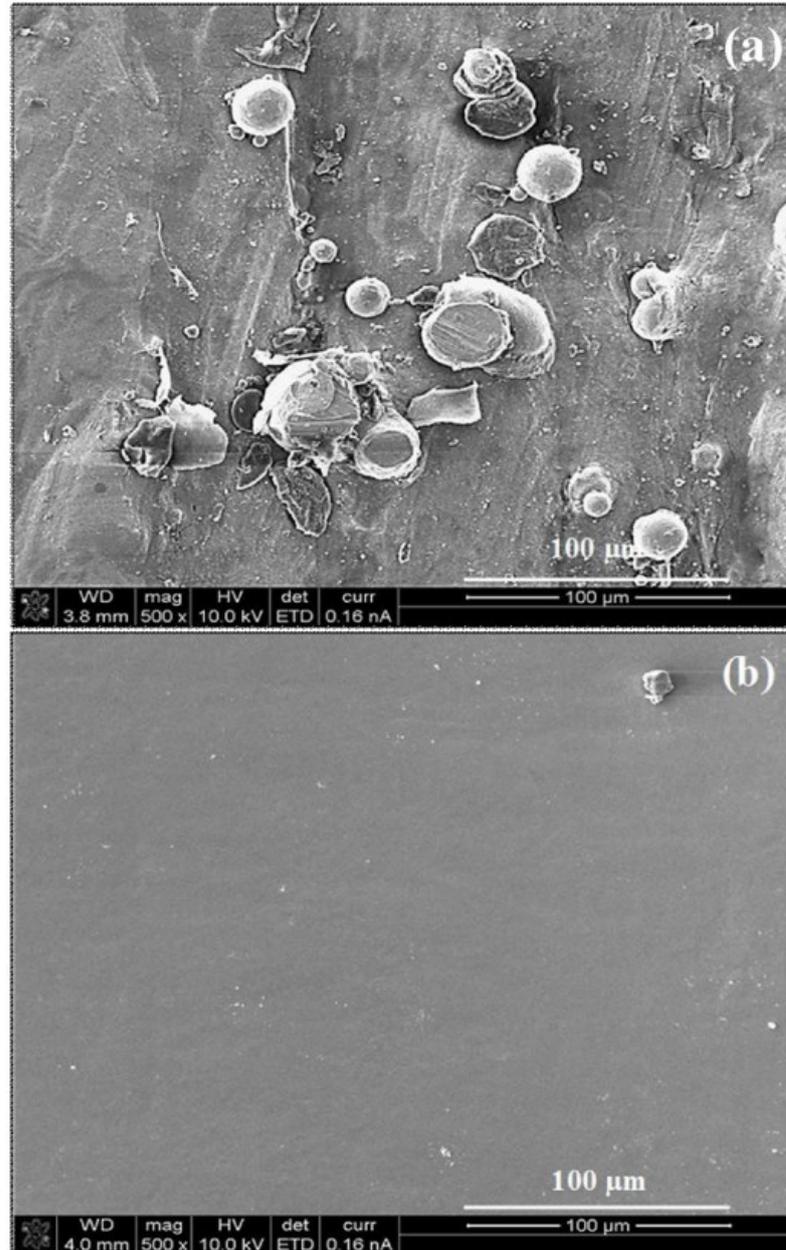
Não há pesquisas sobre a utilização de feixe de elétrons para a confecção de peças de aços *maraging*. Porém, Narayana et al. (2020) realizaram um estudo sobre a utilização da técnica para remover partículas parcialmente fundidas na superfície de aços *maraging* que foram fabricadas utilizando sinterização direta de metal a *laser*. Nesse estudo, constatou-se que, após a fabricação, pequenas partículas que não haviam fundido estavam aderidas à superfície, bem como se observou presença de algumas fissuras, tanto na transversal como na longitudinal, as quais podem ser visualizadas nas Figuras 23a e 23b, respectivamente. Após a exposição à irradiação por feixe de elétrons, ocorreu a remoção de partículas parcialmente fundidas e o preenchimento de fissuras e vazios, tornando a superfície mais uniforme e com acabamento metálico brilhante, como pode ser observado na Figura 24. A irradiação também provocou uma reversão da fase martensita para austenita, que, junto com a melhoria da superfície, aumentou a dureza e a resistência a corrosão.

Figura 23 - Morfologia da camada superior da amostra SLM 18Ni-300. Parâmetros de processo: potência do laser: 350 W; velocidade de varredura: 1200 mm/s; distância de hachura: 0,12 mm; densidade energética: 60,76 J/mm³; ângulo de construção: 50°



Fonte: Adaptado de Narayanan et al. (2021)

Figura 24 - Comparação da morfologia da camada superior da amostra SLM MS a) 18Ni-300 e (b) 18Ni-300 com tratamento posterior de irradiação de feixe de elétrons. Parâmetros de processo: potência do *laser*: 350 W; velocidade de varredura: 1200 mm/s; distância de hachura: 0,12 mm; densidade energética: 60,76 J/mm³; ângulo de construção: 30°



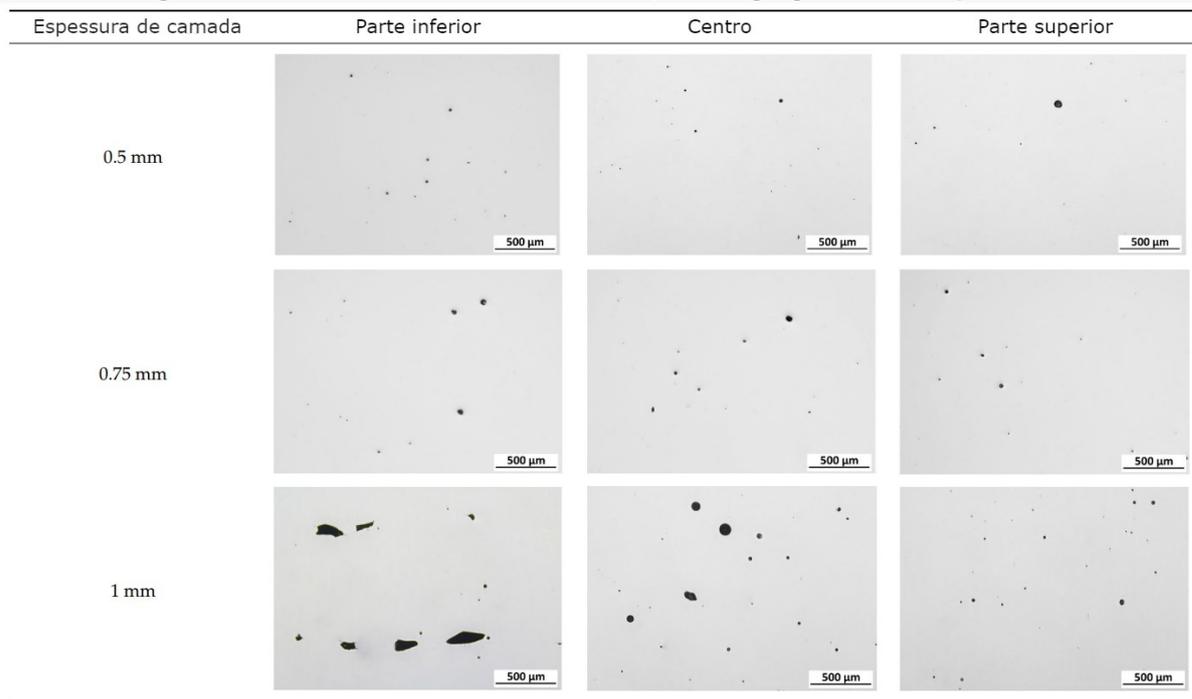
Fonte: Adaptado de Narayanan et al. (2021)

Apesar de haver poucos estudos sobre a aplicação direta da fusão por feixe de elétrons na confecção de peças de aço *maraging*, a técnica pode ser utilizada como pós-tratamento para melhorar a superfície.

4.2.3 Conformação Próxima ao Formato Final via *Laser*

Há poucos estudos onde são empregados aços *maraging* como matéria-prima na técnica de conformação próxima ao formato final via *laser*. Roñda et al. (2022) analisaram a porosidade, microestrutura e composição de fases, microdureza e propriedades mecânicas de tração de amostras fabricadas por LENS, onde foi variada a espessura de camada. Foram utilizadas três espessuras de camadas: 0,5 mm, 0,75 mm e 1 mm. Para analisar a porosidade, foram feitas micrografias de três partes da amostra, como pode ser observado na Figura 25. Ficou evidente que, com o aumento da espessura de camada, ocorre o aumento da porosidade. Foi observada também, a presença de poros esféricos, oriundos de gases liberados durante a fusão do metal, e poros irregulares, principalmente na amostra com 1 mm de espessura de camada, originados pela fusão incompleta da camada.

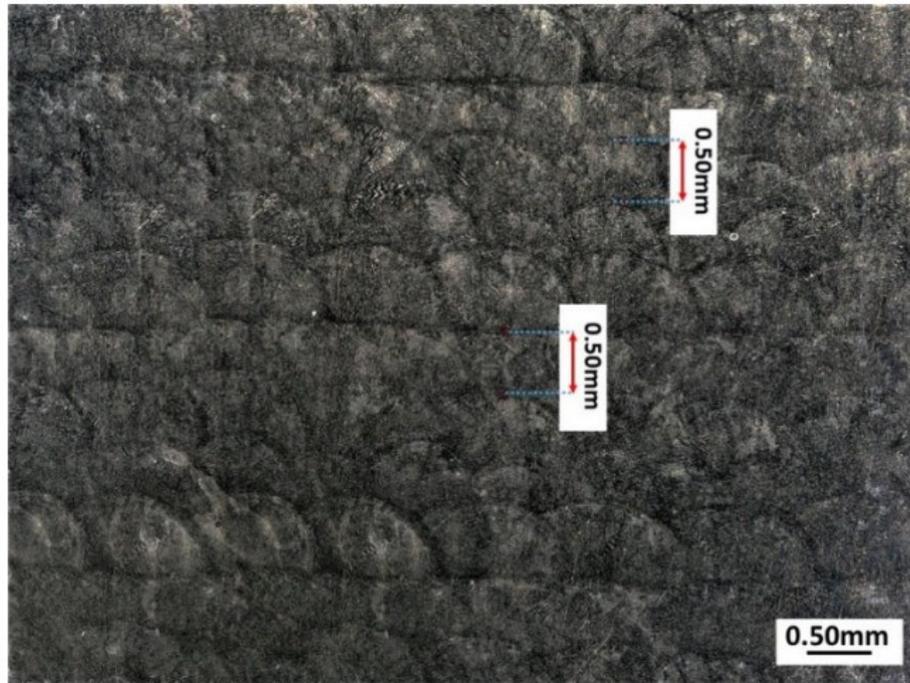
Figura 25 - Porosidade de amostras de aço *maraging* fabricadas por LENS



Fonte: Adaptado de Roñda et al. (2022)

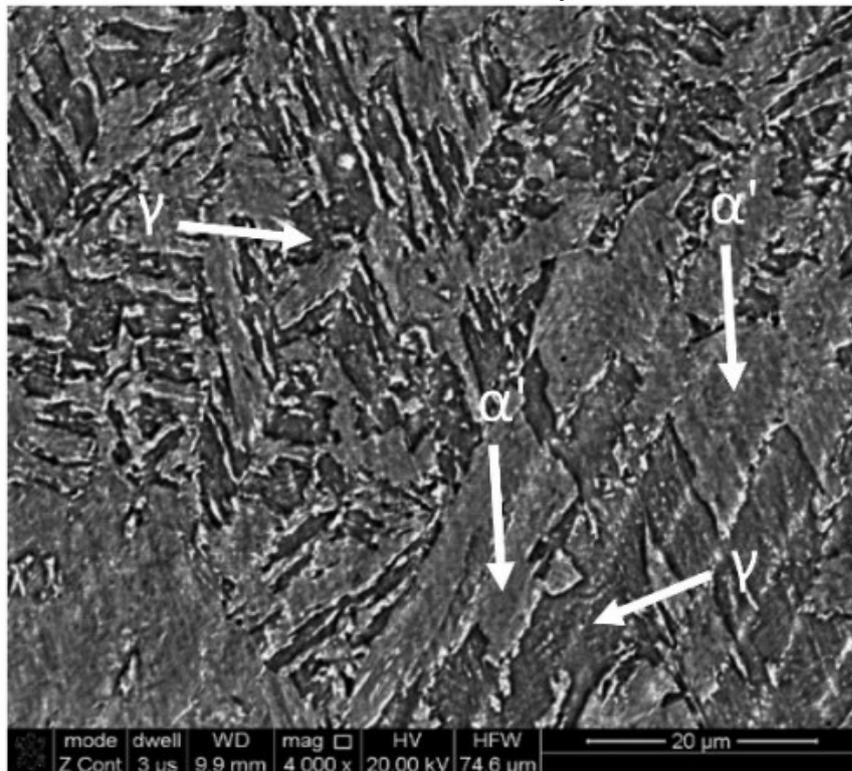
Ainda no estudo de Roñda et al. (2022), foi investigada a microestrutura e composição das fases. Na Figura 26 é possível observar as poças de fusão com profundidade de aproximadamente 0,5 mm. Na Figura 27, a imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura revela a presença de austenita retida e ripas de martensita.

Figura 26 - Microestrutura da amostra com espessura de camada de 0,5 mm



Fonte: Adaptado de Roñda et al. (2022)

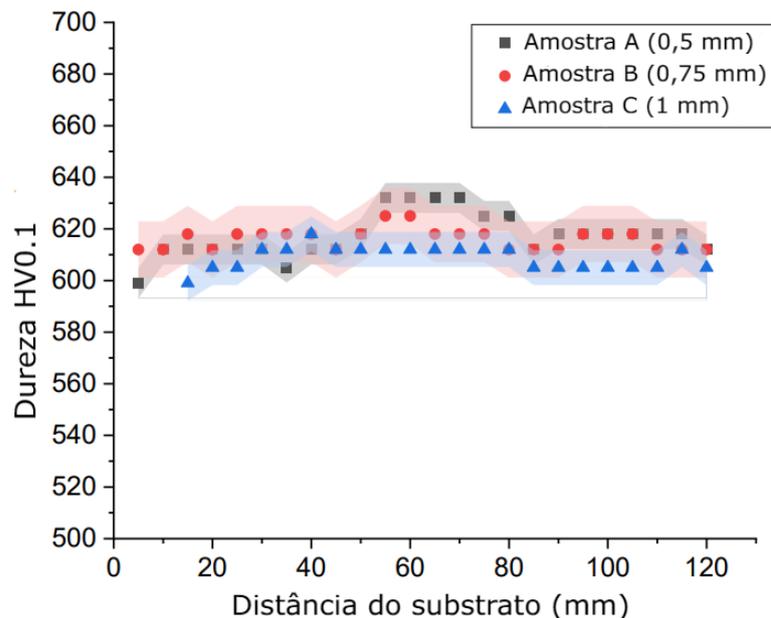
Figura 27 - Microscopia eletrônica de varredura da amostra com espessura de camada de 0,5 mm com escala de 20 μm



Fonte: Adaptado de Roñda et al. (2022)

Em outra parte do estudo foi analisada a microdureza. Na Figura 28, tem-se um gráfico com as durezas de cada amostra. A média de dureza para a amostra A foi 617 HV0.1, 616 HV0.1 para a amostra B e 609 HV0.1 para a amostra C, mostrando que a espessura de camada teve pouca influência na dureza do material. Na Tabela 6, são mostrados os resultados do ensaio de tração das amostras. É possível notar que nas amostras A e B houve pouca diferença nos valores do ensaio de tração, enquanto na amostra C os valores foram bem inferiores em comparação com as outras duas amostras.

Figura 28 - Gráfico das microdurezas das amostras de diferentes espessuras



Fonte: Adaptado de Roñda et al. (2022)

Tabela 6 - Resultados do ensaio de tração das amostras de diferentes espessuras

Espessura da camada	Resistência máxima a tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Elongação(%)
0,5 mm	1958 ± 10	1856 ± 8	194 ± 6	4,8 ± 0,8
0,75 mm	1926 ± 10	1813 ± 20	188 ± 10	3,3 ± 1,0
1 mm	548 ± 60	-	178 ± 8	0,19 ± 0,05

Fonte: Adaptado de Roñda et al. (2022)

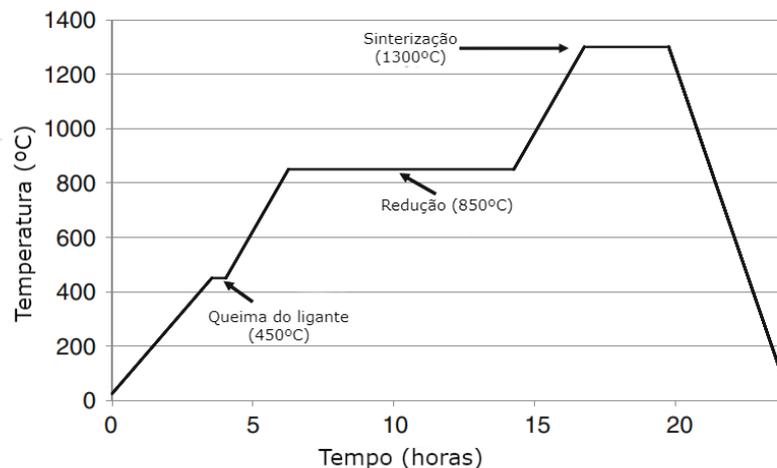
A técnica de conformação próxima ao formato final via *laser*, apesar de ter poucas informações e estudos, parece ser muito promissora. O artigo discutido

explorou a influência da espessura de camada, porém, ainda é necessário um maior aprofundamento, principalmente quanto à presença de austenita retida, que, segundo o estudo, aponta para uma presença significativa dessa fase.

4.2.4 Jato de Aglutinante

Williams, Cochran e Rosen (2010) em seus estudos analisaram pequenos corpos-de-prova, denominados de materiais celulares, cujo foco é oferecer uma baixa massa com uma alta resistência. No estudo foram exploradas a identificação de fases, densidade e porosidade. Durante a parte final de fabricação da amostra, a peça a verde é submetida a um ciclo de aquecimento em três etapas, como representando na Figura 29. Foi realizada a difração de raios X e verificou-se que a amostra foi reduzida totalmente, apresentando somente ferro na fase cúbica de corpo centrado (CCC). A amostra ainda teve a densidade medida de 63% e retração linear de 45%, porém, a porosidade ficou com valores abaixo do desejado.

Figura 29 - Ciclos de redução e sinterização da amostra de aço *maraging*



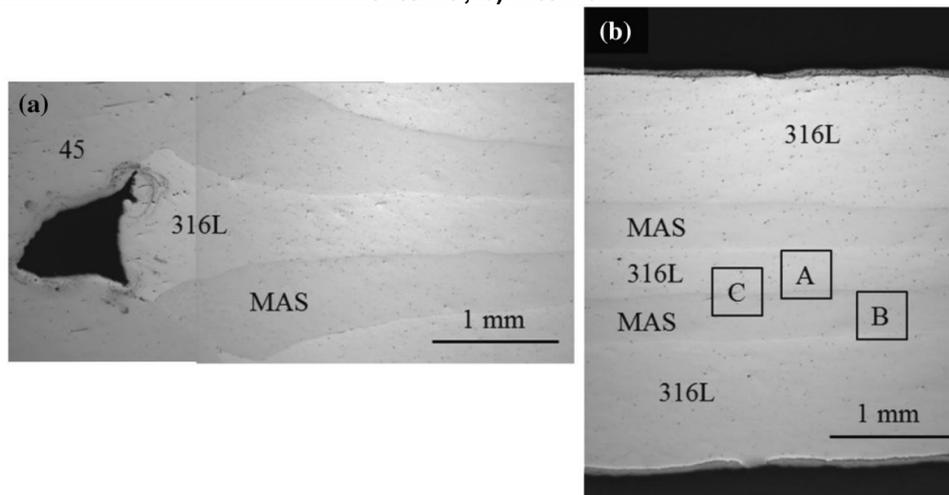
Fonte: Adaptado de Williams, Cochran e Rosen (2010)

4.2.5 Laminação por Camadas

Há poucos estudos onde são empregados aços *maraging* como matéria-prima na técnica de laminação por camadas. Um estudo feito por Zhang et al. (2020), onde se analisou um compósito de aço *maraging* e aço inoxidável 316L. Foram unidas 3 camadas de aço inoxidável 316L e 2 camadas de aço *maraging*, intercaladas entre si e, como resultado, apresentaram uma excelente ligação interfacial com ausência de

defeitos e óxidos, como é possível observar na Figura 30. Entretanto, há ocorrência de fragilização após o tratamento de envelhecimento. O estudo ainda considera que esse método pode ser utilizado para preparar compósitos metálicos multicamadas, que, por apresentarem diferentes constituintes, têm propriedades mecânicas distintas.

Figura 30 - Características da interface do compósito multicamada prensado a quente a) externa; b) interna



Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2020)

4.3 Análise da Viabilidade da Manufatura Aditiva para Aços *Maraging*

Após o estudo dos métodos de manufatura aditiva utilizando os aços *maraging* como matéria-prima ficou evidente que dos cinco métodos, dois se apresentaram no momento como os mais promissores, sendo eles a sinterização direta de metal a *laser* e a conformação próxima ao formato final via *laser*. Desse modo, é interessante comparar os dois métodos que se mostraram possíveis alternativas dos métodos convencionais de laminação a quente e forjamento. Na Tabela 7 tem-se a comparação das vantagens e desvantagens de ambas as técnicas.

Tabela 7 - Comparativo das vantagens e desvantagens entre as técnicas promissoras de MA e convencionais de fabricação de peças de aços *maraging*

Técnicas	Vantagens	Desvantagens
Sinterização direta de metal a <i>laser</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Facilidade de alteração de <i>design</i> • Possibilidade de fabricação de peças com geometria complexa • Rápida prototipagem • Alta precisão 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo de utilização de matéria-prima em pó • Baixa velocidade de produção • Necessidade de usinagem • Limitação de tamanhos de peças
Conformação próxima ao formato final via <i>laser</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Facilidade de alteração de <i>design</i> • Possibilidade de geometria complexa • Rápida prototipagem • Alta precisão 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo de utilização de matéria-prima em pó • Baixa velocidade de produção • Necessidade de usinagem • Limitação de tamanho de peças
Laminação a quente	<ul style="list-style-type: none"> • Alta velocidade de fabricação • Homogeneização química • Propriedades mecânicas satisfatórias 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo com maquinário • Gasto energético para aquecimento • Necessidade de usinagem
Forjamento	<ul style="list-style-type: none"> • Menor custo de fabricação • Propriedades mecânicas satisfatórias • Alta velocidade de fabricação 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo com maquinário • Necessidade de usinagem

Fonte: Autoria própria (2022)

As técnicas de manufatura aditiva são muito promissoras, apesar de ainda estarem no processo de estudo. Apresentam grande potencial de utilização, sendo que as principais vantagens são a rápida prototipagem e a possibilidade de se fabricar peças com geometria complexa. Ambas as técnicas de manufatura aditiva têm como desvantagem a necessidade de matéria-prima em pó, que pode encarecer a produção. Outra problemática é em relação à velocidade de produção, e ao volume da peça.

Para que os produtos fabricados utilizando manufatura aditiva alcancem propriedades satisfatórias, é imprescindível que a matéria-prima tenha boas características, entre elas uma morfologia esférica, pouco irregular e que apresente uma boa distribuição de tamanho de partícula. Com essas características, é possível alcançar maior empacotamento, ocasionando maior densidade e melhor acabamento superficial, além de propriedades mecânicas superiores. Dentre as técnicas de

produção de pó, a atomização por água tem como desvantagem a produção de pós com morfologia irregular e baixo rendimento para partículas de 20-150 μm ; a hidratação-dehidratação, apesar do baixo custo também apresenta morfologia irregular. Diante dessa problemática, duas técnicas poderiam ser utilizadas: a atomização a plasma para produção de partículas de titânio que, apesar do alto custo, produz partículas extremamente esféricas e, para a produção dos outros elementos como níquel, ferro, cobalto e alumínio, a atomização a gás, que também produz partículas esféricas.

5 CONCLUSÃO

Com relação aos objetivos propostos, pode-se concluir:

- (1) A composição química dos aços *maraging* propicia a estes aços, após tratamento térmico, características físicas de materiais da classe de ultra alta resistência; a presença de precipitados e sua matriz martensítica garantem a esse material alta resistência e dureza.
- (2) Dentre as cinco técnicas estudadas, duas apresentaram resultados promissores, sendo elas a sinterização direta de metal a *laser* e a conformação próxima ao formato final via *laser*, sendo que essas duas técnicas podem ser alternativas as técnicas convencionais de fabricação de aços *maraging*.
- (3) Dentre as técnicas restantes estudadas nesse trabalho, a fusão por feixe de elétrons se mostrou interessante para o tratamento superficial de amostras de aço *maraging*. A técnica de jato de aglutinante utilizada para fabricação de materiais celulares apresentou valores de porosidade inferiores aos desejados. A técnica de laminação por camadas utilizada para unir camadas metálicas é atrativa quando se deseja obter um compósito metálico. Estudos mais aprofundados podem fornecer mais aplicações destas técnicas.
- (4) Em comparação com as técnicas convencionais de fabricação de aços *maraging*, a sinterização direta de metal a *laser* e a conformação próxima ao formato final via *laser* se mostraram interessantes, ainda sendo necessários estudos mais aprofundados.
- (5) As técnicas de produção de pós metálicos mais indicadas seriam a de atomização a plasma para o titânio e atomização a gás para os outros elementos dos aços *maraging*.

REFERÊNCIAS

APPARAO, D.; RAJU M. V. J. Experimental Investigation on Maraging Steel Metal Deposition Using DMLS Process. *In: International Conference on Emerging Trends in Engineering (ICETE)*. 07., 2019, Zurich, 2020, v. 2, p. 721-730.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/ASTM 52900**: Manufatura Aditiva - Princípios Gerais - Terminologia. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

AUBERT&DUVAL. **MLX®19 X1NiCrMoAlTi12-10-2**: ultra high strength stainless steel. Fev. 2017. Disponível em: https://www.aubertduval.com/wp-media/uploads/2017/05/Brochure_MLX19_2017_final-version.pdf. Acesso em: 27 set. 2020.

BANDYOPADHYAY, A.; BOSE, S. **Additive manufacturing**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

DAVIES, S. **Invention, optimism & realism: The back story of SLS 3D printing with Dr. Joe Beaman**. 2020. Disponível em: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=powder_preparation. Acesso em: 17 jun. 2022. <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/back-story-sls-3d-printing-dr-joe-beaman/>

DAWES, J.; BOWERMAN, R.; TREPINGTON, R. Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain. **Johnson Matthey Technology Review**, Coventry, v. 59, n. 3, p. 243-256, jul. 2015.

FEITOSA, A. L. M. **EFEITO DA LAMINAÇÃO A FRIO NA REVERSÃO PARCIAL DA MARTENSITA EM AUSTENITA DURANTE TRATAMENTO TÉRMICO DE ENVELHECIMENTO DE AÇO MARAGING 350**. Orientador: Dr. Angelo Fernando Padilha. 2020. 72p. Dissertação (Mestrado) – Escola politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo, 2020.

GANDRA, A. **Produção de aço bruto do Brasil cresce 24% no primeiro trimestre 2021**. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-07/producao-de-aco-bruto-do-brasil-cresce-24-no-primeiro-semester#:~:text=Com%2031%20milh%C3%B5es%20de%20toneladas,bilh%C3%B5es%20entre%202021%20e%202025>. Acesso em: 16 jun. 2022.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**. Nova York: Springer, 2015.

GOMES, J. F. B.; WILTGEN, F. Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 41, n. 1, p. 1-16, abr. 2020.

GORSSE, S. et al. Additive manufacturing of metals: a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys. **Science and Technology of Advanced Materials**, v. 18, n. 1, p. 584-610, ago. 2017.

HALL, A. M.; SLUNDER, C. J. **The Metallurgy, Behavior, and Application of the 18-percent Nickel Maraging Steels**: a survey. Washington: Technology Utilization Division, National Aeronautics and Space Administration, 1968.

KAWAGOISHI, N.; NAGANO, T.; MORIYAMA, M.; KONDO, E. Improvement of Fatigue Strength of Maraging Steel by Shot Peening. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 24, p. 1431-1435, dez. 2009.

KOPELIOVICH, D. **Powder preparation**. 2012. Disponível em: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=powder_preparation. Acesso em: 29 set. 2020. <http://canadamakes.ca/what-is-binder-jetting/>

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisas, elaboração, análise e interpretação de dados**. 6 ed. São Paulo: Atlas, 2007.

MOURITZ, A. **Introduction to Aerospace Materials**. Melbourne: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012.

NARAYANAN, T; KIM, J; JEONG, H; PARK, H. Enhancement of the surface properties of selective laser melted maraging steel by large pulsed electron-beam irradiation. **Additive Manufacturing**. v. 33, p. 1-11, fev. 2020.

OLIVEIRA, J.P.; LALONDE, A.D.; MA, J. Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing. **Materials & Design**, Lisboa, v. 193, p. 1-10, ago. 2020.

PANDA, B.; SAHOO, S. Thermo-mechanical modeling and validation of stress field during laser powder bed fusion of AlSi10Mg built part. **Results in Physics**, v. 12, p. 1372-1381, mar. 2019.

POORNIMA, T; JAGANNATHA, N; SHETTY, A N. Studies on Corrosion of Annealed and Aged 18 Ni 250 Grade Maraging Steel in Sulphuric Acid Medium. **Portugaliae Electrochimica Acta**, v. 28, n. 3, p. 173-188, abr. 2010.

RAJU, N.; ROSEN, D. W. Fatigue Properties of 3D Printed Maraging Steel. In: **2021 International Solid Freeform Fabrication Symposium**. 2021, Austin. University of Texas. Austin, 2021. p. 831-841.

RODRIGUES, A. C.; BERNARDI, H. H.; OTUBO, J. Microstructural Analysis of Co-Free Maraging Steel Aged. **Journal Of Aerospace Technology And Management**, São José dos Campos, v. 6, n. 4, p. 389-394, nov. 2014.

ROÑDA, N.; GRZELAK, K.; POLAŃSKI, M.; & DWORECKA-WÓJCIK, J. (2022). The Influence of Layer Thickness on the Microstructure and Mechanical Properties of M300 Maraging Steel Additively Manufactured by LENS® Technology. **Materials (Basel)**, Switzerland, v. 15, n. 2, jan. 2022.

SCHMIDT M.; ROHRBACH K. **Heat Treating of Irons and Steels**. ASM International, 2014.

SHA, W.; GUO, Z. **Maraging steels**: modelling of microstructure, properties and applications. Cambridge: Woodhead, 2009.

SILBERNAGEL, C. **Additive Manufacturing 101-6: What is sheet lamination?** 2018. Disponível em: <http://canadamakes.ca/what-is-sheet-lamination/>. Acesso em: 26 set. 2020.

SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 2. ed. São Paulo: Pannon Gráfica, 1988.

SUARD, M.; LHUISSIER, P.; DENDIEVEL, R.; BLANDIN, J. J.; VIGNAT, F.; VILLENEUVE. Towards stiffness prediction of cellular structures made by electron beam melting (EBM). **Powder Metallurgy**, v. 57, n. 3, p. 190-195, maio 2014.

TAKATA, N.; NISHIDA, R.; SUZUKI, A; KOBASHI, M; KATO, M. Crystallographic Features of Microstructure in Maraging Steel Fabricated by Selective Laser Melting. **Metals**. v. 8, n. 6, jun. 2018.

USINAGEM-BRASIL. **Sandvik e Renishaw fecham parceria em manufatura aditiva**. 2019. Disponível em: <http://www.usinagem-brasil.com.br/14620-sandvik-e-renishaw-fecham-parceira-em-manufatura-aditiva/>. Acesso em: 26 set. 2019.

WEISS, B. Z. Maraging Steels – Structure, Properties and Applications. **Specialty Steels and hard materials**. *In*: Proceedings of the International Conference on Recent Developments in Specialty Steels and Hard Materials (Materials Development '82), 1982, Pretoria, p. 35-54.

WILLIAMS, C; COCHRAN, J; ROSEN, D. Additive manufacturing of metallic cellular materials via three-dimensional printing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Londres, v. 53, n. 1, p. 231-239, jul 2010.

WOHLERS ASSOCIATES. **3D Printing and additive manufacturing: state of the industry**. Wohlers, 2019.

YASA, E.; KEMPEN, K.; KRUTH, J.P. Microstructure and mechanical properties of maraging steel 300 after selective laser melting. *In*: **2010 International Solid Freeform Fabrication Symposium**. 2010, Austin: University of Texas, 2010. p. 383-396

ZHANG, L. et al. A novel laminated metal composite with superior interfacial bonding composed of ultrahigh-strength maraging steel and 316L stainless steel. **J. Iron Steel Res Int**. Beijing. v. 27, p. 433–439, mai 2019.

ZHANG, Y. et al. Additive Manufacturing of Metallic Materials: a review. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 27, n. 1, p. 1-13, maio 2017.