



BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

BRUNO DE MATTOS KOLESNY

**AÇO MARAGING ORIUNDO DE MANUFATURA ADITIVA VERSUS AÇO AISI D6
ESTUDO DE CASO**

Porto Alegre

2022

BRUNO DE MATTOS KOLESNY

***AÇO MARAGING ORIUNDO DE MANUFATURA ADITIVA VERSUS AÇO AISI D6
ESTUDO DE CASO***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário Ritter dos Reis, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Professor Mestre João Vinícius Vares

Porto Alegre

2022

BRUNO DE MATTOS KOLESNY

**AÇO MARAGING ORIUNDO DE MANUFATURA ADITIVA VERSUS AÇO AISI D6
ESTUDO DE CASO**

Relatório final apresentado ao Centro
Universitário Ritter dos Reis, como parte
das exigências para obtenção do título de
Engenheiro Mecânico.

PORTO ALEGRE, 6 DE DEZEMBRO DE 2022

BANCA EXAMINADORA

João Vinícius Vares Assinado de forma digital por
João Vinícius Vares
Dados: 2022.12.16 15:05:30 -03'00'

Professor Mestre João Vinicius Vares (Orientador)

DocuSigned by:
NATHALIA KRUMMENAUER HARO
9F2C9EE7A4F5445...

Professora Doutora Nathalia Krumenauer Haro

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Senhor Jesus Cristo, pela oportunidade do conhecimento e honrá-lo com meu ofício.

A minha família pelo apoio e incentivo em trilhar este caminho com diligência.

Ao corpo docente do curso de Engenharia Mecânica da UniRitter e todos os colegas e amigos que fizeram parte desta jornada.

Agradeço ao time de Engenharia e a empresa Taurus S/A, do qual faço parte, por me acompanharem durante a construção deste trabalho.

*“... empenhem-se para acrescentar à sua fé a virtude;
e à virtude o conhecimento.”*

2 Pedro 1:5

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar as propriedades mecânicas de um material metálico proveniente de manufatura aditiva por processo de sinterização à laser, comparando-o com outro material metálico proveniente de processos convencionais (laminação e/ou forjamento). Este estudo propõe, a partir dos dados obtidos, demonstrar as principais diferenças entre as resultantes dos processos e entre as características dos materiais Aço *Maraging* e Aço AISI D6, uma vez aplicados a ensaios de tração, ensaios de dureza e análise metalográfica. Através destes resultados e os mesmos avaliados, é possível considerar as principais diferenças em propriedades mecânicas que influenciam na eficiência e validação de protótipos em relação ao material AISI D6.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva; Sinterização à Laser; Prototipagem; Propriedades Mecânicas, Aço *Maraging*.

ABSTRACT

This work aims to analyze the mechanical properties of a metallic material from additive manufacturing by laser sintering process, comparing it with other metallic material from conventional processes (rolling and/or forging). This study proposes, from the data obtained, to demonstrate the main differences between those resulting from the processes and between the characteristics of the materials steel Maraging and AISI D6, once applied to tensile tests, hardness tests and metallographic analysis. Through these results and the same ones evaluated, it is possible to evaluate the main differences in mechanical properties that influence the efficiency and validation of prototypes in relation to the AISI D6 material.

Keywords: Additive Manufacturing; Laser Sintering; prototyping; mechanical properties, Maraging steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquemático de Impressora 3D SLS	17
Figura 2 - Cores Aço AISI D6	19
Figura 3 - Esquemático de Máquina Universal de Ensaio	21
Figura 4 - Esquemático Deformação do Corpo de Prova	22
Figura 5 – Corpo de Prova Cilíndrico	23
Figura 6 - Corpo de Prova Retangular	23
Figura 7 – Esquemático do Processo de Metalografia	27
Figura 8 – Exemplo de Imagem de Metalografia de aço SAE 1020	28
Figura 9 - Esquemático Sinterização Corpo de Prova Maraging	34
Figura 10 – Projeto de Corpo de Prova	34
Figura 11 - Impressora 3D SLS	35
Figura 12 – Fresadora Ferramenteira Clever	35
Figura 13 – Amostras Aço Maraging Manufatura Aditiva	36
Figura 14 - Amostras Aço AISI D6	36
Figura 15 – Equipamento de Ensaio Tensão Deformação	37
Figura 16 - Cortadora Metalográfica	38
Figura 17 - Embutidora Arotec	38
Figura 18 - Politriz Teclago	39
Figura 19 - Microscópio para Metalografia	39
Figura 20 - Representação Esquemática Ensaio Rockwell	40
Figura 21 - Durômetro Wilson	40
Figura 22 - Corpo de Prova Maraging	43
Figura 23 – Fotografia Microscópica Corpo de Prova Aço <i>Maraging</i>	44
Figura 24 - Fotografia Microscópica Corpo de Prova Aço <i>Maraging</i>	45
Figura 25 - Amostras AISI D6	45
Figura 26 - Imagem de Metalografia AISI D6	48
Figura 27 - Micrografia Aço Maraging MA	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição Aço AISI D6 (%)	18
Tabela 2 - Composição Aço Maraging (%).....	19
Tabela 3 – Composição Aço Maraging Para Manufatura Aditiva (%).....	20
Tabela 4 - Tabela de Escala de Dureza Rockwell	30
Tabela 5 - Tabela de Escala de Dureza Rockwell Superficial	31
Tabela 6 – Ensaio AISI D6	41
Tabela 7 – Ensaio Aço Maraging Manufatura Aditiva.....	41
Tabela 8 - Tabela Ensaio de Dureza Rockwell.....	50

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico Curva de Engenharia	25
Gráfico 2– Gráfico Deformação Elástica.	25
Gráfico 3 – Diferença dos Resultados em Resistência à Tração	42
Gráfico 4 - Diferença dos Resultados em Tensão de Ruptura	42
Gráfico 5 - Força x Deslocamento Maraging MA.....	46
Gráfico 6 - Força x Deslocamento AISI D6	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – American Iron and Steel Institute

Al₂O₃ – Óxido de Alumínio

C₂H₅OH – Álcool Etílico

HRC – Dureza Rockwell C

HNO₃ – Ácido Nítrico

kgf – Quilograma-força

MA – Manufatura Aditiva

mm – Milímetro

N/mm² - Newton por milímetro quadrado

SLS - *Selective Laser Sintering*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA	14
1.2. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	15
1.3. OBJETIVOS DA PESQUISA	15
1.3.1. Objetivo Geral	15
1.3.2. Objetivos Especificos	15
1.4. JUSTIFICATIVA	16
2. REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1. MANUFATURA ADITIVA (MA).....	17
2.2. AÇOS FERRAMENTA.....	18
2.3. AÇO FERRAMENTA AISI D6.....	18
2.4. AÇO <i>MARAGING</i>	19
2.5. ENSAIO DE TRAÇÃO	20
2.6. CURVA DE ENGENHARIA	24
2.7. ANÁLISE METALOGRAFICA.....	26
2.8. ENSAIO DE DUREZA DE PENETRAÇÃO (ROCKWELL)	29
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	32
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	32
3.2. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DA COLETA DE DADOS.....	33
3.3. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	33
3.3.1. ENSAIO DE TRAÇÃO.....	37
3.3.2. ANÁLISE METALOGRAFICA	37
3.3.3. ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL.....	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1. ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	41
4.2. ANÁLISES METALOGRAFICAS.....	48

	13
4.3. ENSAIOS DE DUREZA.....	49
5. CONCLUSÃO	51
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
REFERÊNCIAS.....	53

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva está cada vez mais presente na indústria brasileira, junto com ela seus diversos processos e características de materiais deixam lacunas de quando se deve empregar o recurso (BETIM; TEIXEIRA; GOMES; QUELHAS; SANTOS, 2019). Sabe-se que aço AISI D6, proveniente de processos de forjamento e laminação, suporta altas pressões, amplamente utilizado na indústria para fabricação de ferramentas para corte à frio, instrumentos de medição, moldes de injeção (SILVA; MEI, 2006). No entanto, quando se comenta de manufatura aditiva, tem-se um limitante quanto aos materiais que são suportados pelos processos.

Se utiliza, por exemplo, o composto de aço *Maraging* para produção de diversos modelos e protótipos em manufatura aditiva SLS, por vezes substituindo aços que eram mais comumente encontrados no mercado. Faz-se necessária uma pesquisa em âmbito comparativo de ambos materiais citados acima, afim de entender de forma analítica, se a utilização de aço *Maraging* proveniente de manufatura aditiva em relação a utilização do aço D6 compete as devidas características para entender a confiabilidade dos protótipos produzidos.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

Dentre as tecnologias utilizadas na metalurgia, a Manufatura Aditiva vem ganhando espaço no quesito materialidade e geometrias complexas. Uma dúvida que se tem são as características que esse tipo de processo consegue entregar, relacionado ao método convencional de prover componentes complexos: usinagem e fundição.

A grande questão é em relação as características mecânicas que se consegue manter através do processo de impressão 3D por sinterização de partículas de aço em relação aos métodos tradicionais de fornecimento, como laminados que são bem comuns no mercado. Uma vez o método de impressão sendo eficiente no fornecimento de componentes únicos que não necessitam de outros processos posteriormente, dos quais podem gerar trincas e/ou tensões internas. Porém, podem existir dúvidas quanto ao processo de impressão 3D de materiais metálicos, como porosidades, limites de tensão, limites de escoamento, organização dos grãos e dureza.

Em vista do acima exposto, este trabalho se propõe a buscar por respostas para a seguinte questão de pesquisa: O quanto é comparável as propriedades mecânicas dos materiais AISI D6 e *Maraging* quando submetidos aos ensaios de tração, metalografia e ensaios de dureza. Buscando validar as propriedades mecânicas de materiais provenientes de processos distintos.

1.2. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Este estudo concentra-se na comparação de dois materiais, um proveniente de usinas siderúrgicas e outro de manufatura aditiva, tecnologia que ganha espaço através da metodologia de indústria 4.0. Serão observados através dos ensaios de tração, dureza e metalográficos de amostras, as principais características e diferenças observadas nos gráficos de tensão X deformação, imagens microscópicas e ensaios de dureza, buscando validar a confiabilidade na utilização de protótipos utilizando a Manufatura Aditiva.

1.3. OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos do presente trabalho foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos, os quais serão apresentados a seguir.

1.3.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo mais amplo deste trabalho dedica-se a estudar as diferenças entre o Aço *Maraging*, produzido através de manufatura aditiva seletiva à laser e o AISI D6, proveniente de laminação ou forjamento, buscando avaliar as características e o quanto há de influência em protótipos construídos com manufatura aditiva.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Definir através de ensaios mecânicos de tração, ensaios de dureza e metalografias, quais as principais diferenças e similaridades entre um material proveniente de manufatura aditiva e um material de processos de conformação mecânica.
- Coletar dados sobre as tensões x deformações dos aços *Maraging* e aço AISI D6, elaborando uma comparação técnica entre ambos materiais, identificando suas particularidades.
- Rastrear os principais prós e contras de cada material, de forma comparativa em relação a pressões exercidas até seu rompimento.

- Justificar a aplicabilidade dos materiais quanto as suas funções mecânicas e a possibilidade de testes reais com componentes provenientes de Manufatura Aditiva.
- Disseminar a aplicabilidade de impressoras 3D com sinterização seletiva à laser, uma vez que esse tipo de equipamento tende a ficar mais comum nas empresas brasileiras e no mundo, juntamente com o avanço da quarta revolução industrial e da tecnologia embarcada.

1.4. JUSTIFICATIVA

A evolução da quarta revolução industrial, torna mais acessível a utilização de novas técnicas de manufatura. Com o avanço tecnológico proveniente do crescimento da indústria global, processos para se minimizar essas perdas se fazem cada vez mais presentes em campos de pesquisa e desenvolvimento, como a manufatura aditiva, entregando soluções prontas em diversas ligas metálicas (INÁCIO; DROZDA; SILVA; MARQUES; SELEME, 2020).

Avaliando a escassez de comprovações a respeito dos benefícios da manufatura aditiva, principalmente sobre o Aço *Maraging*, em campos de Pesquisa e Desenvolvimento e testes funcionais, fica evidente a necessidade de um estudo que apresente a relação das principais propriedades mecânicas destes materiais provenientes de processos industriais diferentes.

2. REVISÃO DE LITERATURA

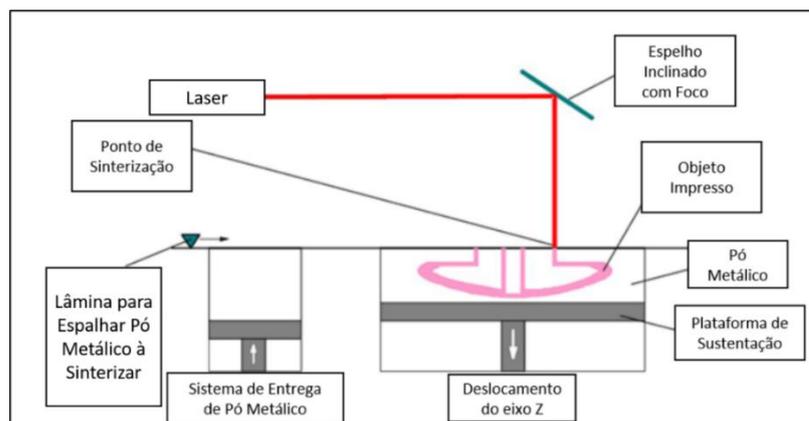
Neste capítulo será apresentado os principais conceitos técnicos dos processos de manufatura aditiva, ensaios de tração, dureza e análise metalográfica. O entendimento básico dos assuntos abaixo permitirá ao leitor compreender e avaliar melhor o resultado final e suas conclusões.

2.1. MANUFATURA ADITIVA (MA)

A Manufatura Aditiva (MA) é um dos recursos agregados a indústria através da quarta revolução industrial, ela permite que possam ser criados protótipos de novos produtos ou componentes diversos prontos para uso de forma ágil e prática. (THOMAS, 2016). O termo *manufatura* origina-se do latim *manufactus*, que por sua vez significa feito à mão. Com o passar dos anos a manufatura vem presenciando diversos avanços tecnológicos, principalmente durante a terceira e a quarta revolução industrial, com a informatização dos recursos levando a uma manufatura digital direta. (BHAVAR, 2017).

A MA de metais com o conceito SLS é um avanço tecnológico para a indústria, onde baseia-se na sinterização seletiva a laser, em inglês *Selective Laser Sintering (SLS)*. Esse processo utiliza pó de metal, combinado da composição base desejada, e um laser de alta potência que se move através de coordenadas do desenho 3D programado no hardware da máquina, assim sinterizando o pó de metal conforme o desenho e a escala programada, por camadas. A figura 1 representa uma imagem do esquema de funcionamento do equipamento. (GRATTON, 2012).

Figura 1- Esquemático de Impressora 3D SLS



Fonte: Adaptado de Metal AM (2022)

2.2. AÇOS FERRAMENTA

Os aços ferramenta são caracterizados por serem de alta liga metálica e serem utilizados amplamente para confeccionar diversos tipos de ferramentas (SILVA; MEI, 2006). As propriedades desse tipo de aço se generalizam por:

- Elevada dureza a temperatura ambiente e a quente.
- Tenacidade
- Elevada resistência ao desgaste.
- Elevada resistência a fadiga.
- Boa usinabilidade.
- Temperabilidade.

Existem diversos materiais e normas de nomenclatura desses, que se caracterizam, conforme NBR NM 122-1, 2005:

- Aços Rápidos (T e M);
- Aços para trabalhos a quente (H);
- Aços para trabalhos a frio (D);
- Aços resistentes a impactos (S);
- Aços Especiais (L e F);
- Aços temperáveis em água (W);
- Aços temperáveis em óleo (O);
- Aços temperáveis em ar (A).

2.3. AÇO FERRAMENTA AISI D6

Aço carbono, classificado pela NBR como aço ferramenta, desenvolvido para utilização em ferramentas de trabalho à frio, ferramentas de corte, fabricação de instrumentos de medição, utilização em guias de máquinas operatrizes e de modo geral em operações que necessitam de resistência ao desgaste e retenção de corte. O aço AISI D6 tem como referência a sua composição a tabela 1, segundo o fabricante *Villares Metals*.

Tabela 1- Composição Aço AISI D6 (%)

Carbono	Silício	Manganês	Cromo	Vanádio	Tungstênio	Ferro
2,05	0,3	0,4	12,00	0,15	0,7	Bal.

Fonte: Villares Metals (2022)

O aço AISI D6, tem como suas principais características a alta resistência à abrasão e ao desgaste e ótima conservação dimensional. Aço de alta temperabilidade, podendo apresentar altos índices de dureza na escala Rockwell, próximos de 62 HRc, boa usinabilidade, porém decorre de cuidados para a remoção superior a 30%, sendo recomendado realizar o processo de alívio de tensões. Geralmente fornecido em barras quadradas, redondas ou retangulares, tem como identificação as cores na sequência: amarelo, verde, amarelo, conforme figura 2.

Figura 2 - Cores Aço AISI D6



Fonte: Villares Metals (2022)

2.4. AÇO MARAGING

O aço Maraging caracteriza-se como aço de alta resistência devido suas propriedades mecânicas, alcançando valores próximos de 2000 Mpa em ensaios de resistência à tração, contendo baixos teores de carbono, altos teores de Níquel e boa tenacidade. A nomenclatura *Maraging* justifica-se por “*Mar*” proveniente de uma transformação martensítica e “*Aging*” proveniente de “Envelhecimento”, atribuídos essas características ao seu processo de endurecimento que quando solubilizados passam por uma reação metalúrgica sem carbono. (MAGNÉE; DUMONT; COUTSOURADIS; HABRAKENL, 1974)

O aço *Maraging*, refere-se a uma liga quaternária de Níquel, Cobalto, Molibdênio, Alumínio e Titânio. Segundo a literatura com a composição, conforme tabela 2.

Tabela 2 - Composição Aço Maraging (%)

Níquel	Cobalto	Molibdênio	Alumínio	Titânio
17 – 19	8,5 – 9,5	4,6 – 5,2	0,05 – 0,15	1,4 – 1,7

Fonte: Adaptado de MAGNÉE A.; DRAPIER J. M.; DUMONT J.; COUTSOURADIS D.; HABRAKENL, 1974.

O aço *Maraging* se torna atrativo para uso em diversos setores devido suas características mecânicas, como citado anteriormente, mas também por suportar diversos processos de beneficiamento, podendo construir componentes complexos e ultra resistentes necessários em setores como aeroespacial, automobilístico e bélico (MAGNÉE; DUMONT; COUTSOURADIS; HABRAKENL, 1974).

Além de ser encontrado em barras e lingotes, o aço *Maraging* também é utilizado para beneficiamento em pó para os processos de Manufatura Aditiva (MA) através de sinterização seletiva à laser conhecido como SLS, sendo assim, possível produzir componentes extremamente complexos (GÜIZA, G. M.C. 2015).

Nas condições de fornecimento em pó de aço, a composição se altera para viabilizar a sinterização, conforme tabela 3.

Tabela 3 – Composição Aço *Maraging* Para Manufatura Aditiva (%)

Carbono	Manganês	Silício	Titânio	Molibdênio	Cobalto	Níquel	Ferro
≤0.03	≤1.0	≤1.0	0.9 – 1.1	4.0 – 6.0	9.0 - 11.0	17.0 – 19.0	Bal.

Fonte: Adaptado de 3dSystems (2022)

Mesmo com um processo de sinterização, após solidificado o componente, ele pode ser tratado termicamente pelos baixos teores de carbono, elevando suas características mecânicas presentes, características de um aço *Maraging* proveniente de processos convencionais de conformação. (3DSystems, 2022).

O aço *Maraging* proveniente de MA, segundo 3D Systems (2019), após manufaturado oferece boa soldabilidade e usinabilidade sem perder as propriedades mecânicas características do aço. Tornando possível que seja realizado tratamento térmico após a confecção do componente desejado.

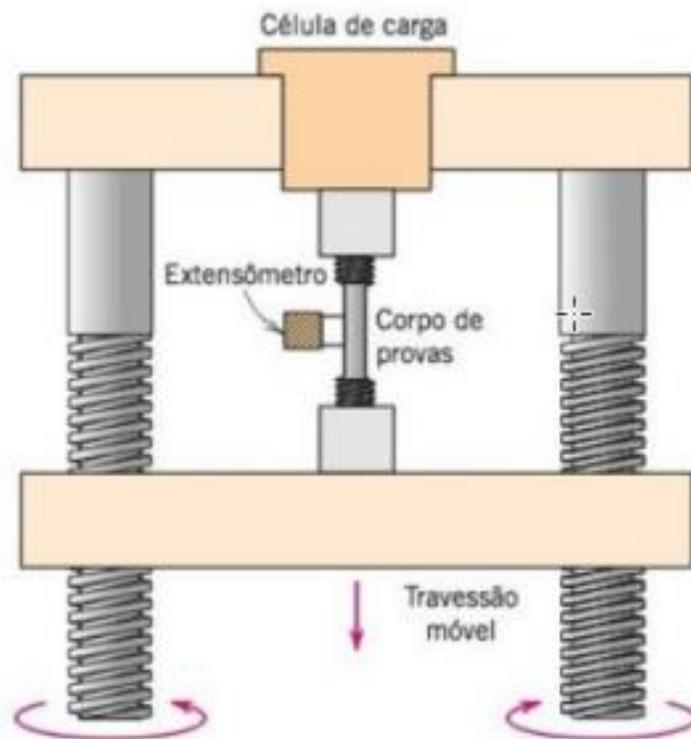
2.5. ENSAIO DE TRAÇÃO

Este ensaio destrutivo consiste em utilizar um sistema de garras, prendendo a amostra e exercendo uma força uniaxial, com o objetivo de gerar alongamento e ruptura do material em análise. Toda movimentação do instrumento é monitorada por sensores que geram gráficos computadorizados, onde pode-se a partir do ensaio conhecer o comportamento do material em relação as tensões de tração, entender

os limites de tração e tensões máximas de resistência dos materiais em diversas condições (PERINI, 2008).

A figura 3 representa um equipamento de ensaio de tração. Mede de forma simultânea a força que é aplicada (F), com uma célula de carga em relação ao deslocamento, que é acompanhado por um sensor extensômetro.

Figura 3 - Esquemático de Máquina Universal de Ensaio



Fonte: Callister (2012)

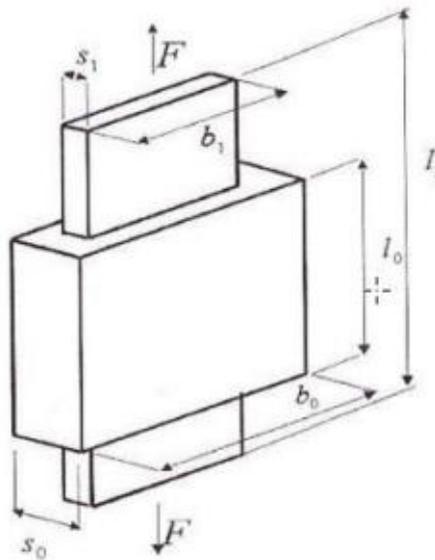
Conhecidos a força exercida e o deslocamento durante o processo do equipamento, se obtém as tensões e deformações do material em análise. Por meio dessas informações geradas e das dimensões do corpo de prova, se pode calcular a tensão de engenharia pela equação 1 (CALLISTER, 2012).

$$\sigma = \frac{F}{A_0} [N/mm^2] \quad (1)$$

Onde “F” é a força aplicada durante o processo de deslocamento; “A₀” é a área da secção transversal do corpo de prova originalmente, antes do ensaio. (CALLISTER, 2012).

As deformações que ocorrem durante o ensaio são baseadas nas equações 2, 3 e 4, que são relacionadas com os parâmetros de ensaio, como podemos observar na figura 4:

Figura 4 - Esquemático Deformação do Corpo de Prova



Fonte: SCHAEFFER (2009)

Onde as deformações são representadas pelas equações abaixo, considerando-se, em campo as dimensões do corpo de prova.

$$\Delta l = l_1 - l_0 \quad (2)$$

$$\Delta b = b_1 - b_0 \quad (3)$$

$$\Delta s = s_1 - s_0 \quad (4)$$

Deformações de engenharia, que se baseiam-se para construção do gráfico, são dadas pela equação 5:

$$\epsilon = \left[\frac{\Delta l}{l_0} \right] \times 100(\%) \quad (5)$$

Onde " Δl " corresponde a " $l_1 - l_0$ ", onde respectivamente correspondem ao alongamento final e alongamento inicial/posição inicial do corpo. (DIETER, 1981)

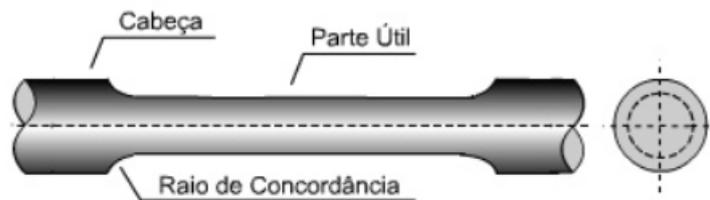
Nesse método de ensaio destrutivo, pode-se avaliar além da deformação plástica a deformação elástica, essa qual é uma deformação temporária, uma vez que essa é recuperada após retirar a carga exercida sobre o corpo de prova.

Os corpos de prova podem ser de diversos formatos, desde que sigam a norma ABNT NBR ISO 6892, que define o formato do corpo de prova de acordo com o seu material de origem:

- Aço em formatos circular ou irregular: seção circular
- Aço proveniente de fundição: deve ser uma extensão do componente fundido, em uma seção circular, usinada.

Um corpo de prova, compõe-se das seguintes partes: cabeça, raio de concordância e parte útil. Conforme figura 5 e figura 6.

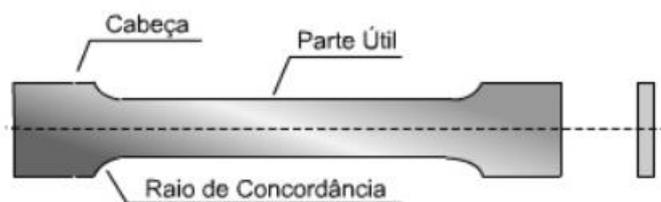
Figura 5 – Corpo de Prova Cilíndrico



Fonte: ABNT NBR ISO 6892 (2013)

Quando se trata de aços provenientes de chapas, o corpo de prova tem seção retangular usinada com a espessura do material em que irá avaliar. Obedecendo as partes de cabeça, parte útil e raios de concordância (ABNT 6892, 2013).

Figura 6 - Corpo de Prova Retangular



Fonte: ABNT NBR ISO 6892 (2013)

Quanto ao comprimento considera-se no mínimo cinco vezes o diâmetro quando eixo ou espessura da chapa na região útil do corpo de prova (ABNT 6892, 2013).

2.6. CURVA DE ENGENHARIA

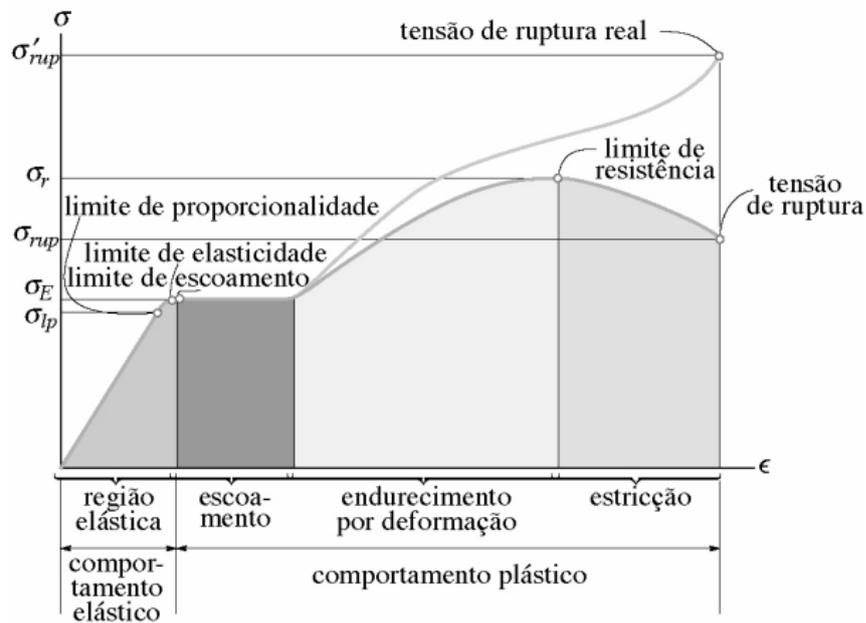
Quando se divide a força (F) pela seção de área inicial do corpo de prova (A_o) se obtém a tensão de engenharia. (SHACKELFORD, 2008)

Dentro do conceito de Curva de Engenharia, existem características que devem ser avaliadas no gráfico, como:

- Tensão de Escoamento: Parâmetro que indica o início do encruamento do material, ponto em que o material está em deformação plástica e acontece um endurecimento a frio por deformação.
- Tensão Máxima: É o parâmetro em que acontece a ruptura do material, seu limite de resistência. Após esse ponto o gráfico tende a apresentar quedas de esforço mecânico, em função de sofrer estrição não apresenta deformações uniformes até sua total ruptura.
- Módulo de Elasticidade: Coeficiente característico do material e/ou liga em análise, que mede o quanto rígido é o material. Quanto maior é o número desse coeficiente, menor é a deformação elástica em relação a aplicação de carga. (HIBBELER, 2003)

O gráfico 1, é um exemplo de curva de engenharia, conhecida também como curva tensão-deformação:

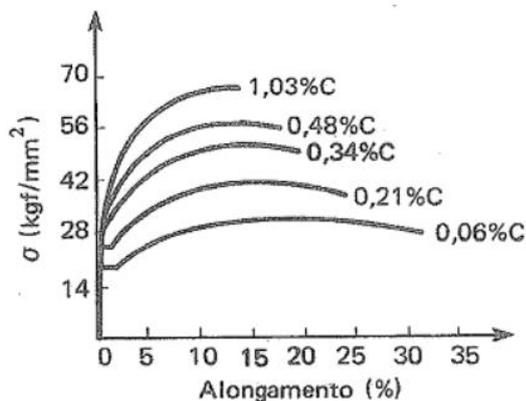
Gráfico 1 - Gráfico Curva de Engenharia



Fonte: HIBBELER (2003)

A curva de engenharia pode não ter o mesmo comportamento em corpos de prova de mesma liga, esse comportamento se justifica na composição e no processamento para se obter o aço, mas as características de modo geral apresentam-se de forma muito próxima. Em outras situações, em que tem ligas distintas, observa-se teores maiores de carbono quando as deformações elásticas são mais elevadas. Como ilustra o gráfico 2, teores maiores de carbono na composição elevam os níveis de resistência, proporcionalmente ligados a menor alongamento e menores módulos de elasticidade (SOUZA, 1982).

Gráfico 2- Gráfico Deformação Elástica.



Fonte: SOUZA (1984)

2.7. ANÁLISE METALOGRAFICA

É um método de análise de materiais que através de uma amostra da estrutura a ser estudada se executa os processos de corte, polimento e ataque químico. Pode-se, através de microscópio distinguir características do material, por meio da interpretação de relevos, diferenciação de cores, falhas estruturais e organização dos grãos da liga analisada (COLPAERT, 2008).

Utiliza-se comumente para realizar a análise o processo de ataque químico com 1 a 5 ml de ácido nítrico (HNO_3) e 90 a 95 ml de álcool etílico ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), solução indicada para reação com metais de baixo a médio carbono, realçando os grãos da matéria analisada, absorvendo a luz do microscópio, sendo possível visualizar a microestrutura e seus constituintes (COLPAERT, 2008).

Esse tipo de análise exige um grande conhecimento por parte do analisador quanto ao comportamento dos materiais, suas características e propriedades.

É necessário seguir um passo a passo de preparação da amostra antes de ser atacada com ácido revelador. Obtém-se uma amostra do material que se quer analisar e após deve ser cortado uma pequena parte da amostra em uma serra. Posterior a isso uma pequena amostra é disposta no equipamento de embutir, do qual neste será embutido a um polímero, geralmente utiliza-se baquelite ou acrílico para facilitar o manuseio durante a próxima etapa e também proporcionar uma boa área de trabalho.

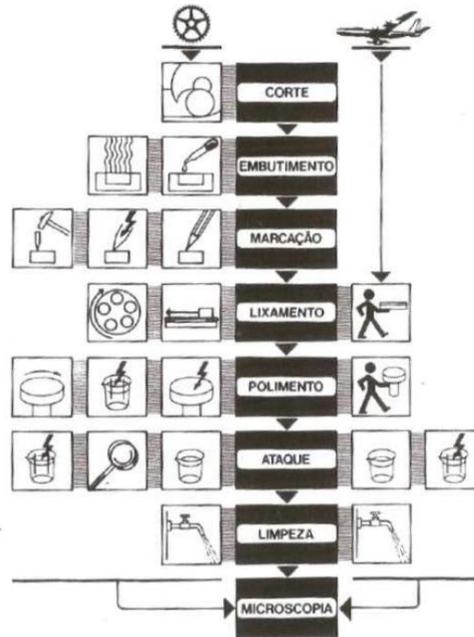
Na etapa de lixamento são utilizadas lixas d'água com granulometria 200 e seguidas pelos granulometrias 320, 400 e 600 para o desbaste do excesso de baquelite e posteriormente utiliza-se granulometrias 1000 a 1200 para preparação da região metálica para receber o polimento. Todo processo de lixamento é feito sob resfriamento a água.

No polimento utiliza-se tecidos colados a discos de politrizes específicas para o estudo, do qual são depositados pequenas porções de abrasivos em pasta, os mais comuns são óxido de alumínio e pasta de diamante.

Concluídas as etapas anteriores, é preparado o ataque químico a amostra, este varia conforme o material que está sendo analisado. A amostra embutida fica em contato com o ácido durante certo período de tempo, este causará a corrosão da superfície metálica que permitirá a visualização com microscópio dos microconstituintes de aço e seus contornos. (COLPAERT, 2008)

Na figura 7 ilustra-se um esquema do processo descrito anteriormente.

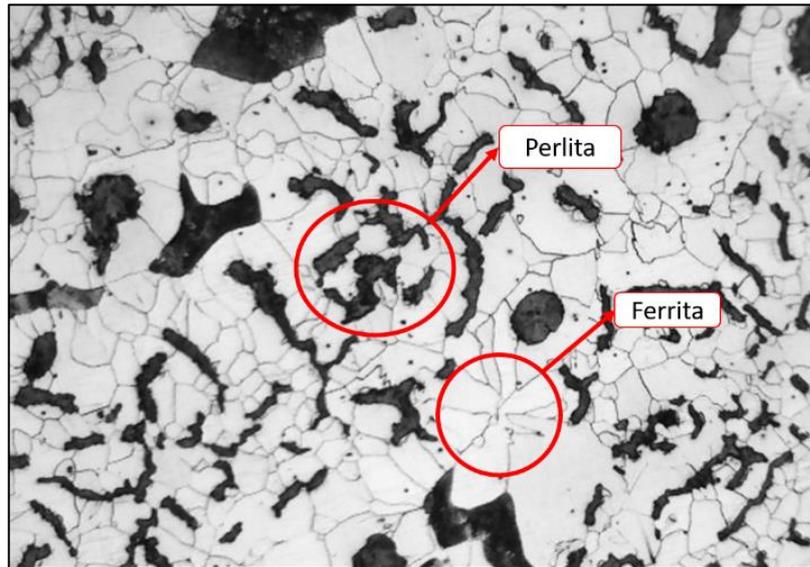
Figura 7 – Esquemático do Processo de Metalografia



Fonte: FAZANO (1980)

Obtendo-se as informações na análise metalográfica, pode-se afirmar características das propriedades de composição do material de forma comparativa, observando as quantidades de perlita, ferrita e cementita em relação a área, também pode-se observar quanto aos tipos de organizações de microestruturas de metais de modo geral, conforme pode-se observar na figura 8 (COLPAERT, 2008).

Figura 8 – Exemplo de Imagem de Metalografia de aço SAE 1020



Fonte: Adaptado de LabMetal (2022)

Com as informações na análise metalográfica, pode-se afirmar características das propriedades de composição do material de forma comparativa, observando as quantidades de perlita, ferrita e cementita em relação a área onde estes são elementos da microestrutura que compõem o aço, e surgem durante o processo de solidificação, onde são mais fáceis visualiza-las em ligas ferro-carbono. Abaixo, as características de cada:

- Ferrita: Termo utilizado para a fase ferro puro, estado sólido, com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado. Está presente em todas as ligas de ferro-carbono, é dúctil e pouco resistente.
- Perlita: É uma mistura sólida de ferrita e cementita, que surge durante o resfriamento da liga ferro-carbono, onde seu aparecimento pode variar de acordo com o resfriamento do aço durante o processo de fundição. De modo geral, é mais resistente e menos maleável que a ferrita isolada.
- Cementita: Em sua forma pura é comumente classificado como cerâmica, é um material muito rígido e frágil, facilmente encontrado em misturas com perlita e ferrita, encontrado em ferros fundidos e aços com características menos dúcteis e com tratamento térmico. Formando-se a partir do limite de solubilidade do aço, em torno de 6,7% de Carbono (SHACKELFORD, 2008).

2.8. ENSAIO DE DUREZA DE PENETRAÇÃO (ROCKWELL)

Amplamente utilizado na indústria pela facilidade de execução, interpretação dos resultados e de equivalências. Através de um ensaio de dureza, pode ser utilizado em pelo menos três interpretações como: conhecimento de resistência mecânica e ao desgaste, controle de deformação plástica, controle de processos de tratamento térmico (FERREIRA, 2011).

O ensaio consiste em medir a dureza a partir da pressão de uma esfera ou penetradores cônicos, também conhecido como “Brale” com 120° de conicidade, sobre uma superfície plana, com baixa rugosidade. Após a disposição da amostra na máquina aplica-se uma pré-carga e posteriormente a carga definitiva. Não sendo necessário nenhum cálculo externo ou intervenção humana na avaliação do resultado, sendo lido diretamente no visor do equipamento (SOUZA, 1982).

Através da equação 6 pode-se chegar ao resultado da força resultante.

$$F = F_0 + F_1 \quad (6)$$

Onde “ F ” é a resultante, “ F_0 ” é a pré carga e “ F_1 ” é a “carga maior” conforme mostra a tabela 4, assim como as variantes de escala, cores do indicador, cargas, faixas de utilização e campos de aplicação em relação ao material.

Tabela 4 - Tabela de Escala de Dureza Rockwell

ESCALA DE DUREZA ROCKWELL NORMAL E APLICAÇÕES					
ESCALA	COR DA ESCALA	CARGA MAIOR	PENETRADOR	FAIXA DE UTILIZAÇÃO	CAMPO DE APLICAÇÃO
A	preta	60	diamante cone 120°	20 a 88 HRA	Carbonetos, folhas de aço com fina camada superficial endurecida
C	preta	150	diamante cone 120°	20 a 70 HRC	Aço, titânio, aços com camada endurecida profunda, materiais com HRB>100
D	preta	100	diamante cone 120°	40 a 77 HRD	Chapas finas de aço com média camada endurecida
B	vermelha	100	esfera aço 1,5875 mm	20 a 100 HRB	Ligas de cobre, aços brandos, ligas de alumínio, ferro maleável etc.
E	vermelha	100	esfera aço 3,175 mm	70 a 100 HRE	Ferro fundido, ligas de alumínio e de magnésio
F	vermelha	60	esfera aço 1,5875 mm	60 a 100 HRF	Ligas de cobre recozidas, folhas finas de metais moles
G	vermelha	150	esfera aço 1,5875 mm	30 a 94 HRG	Ferro maleável, ligas de cobre-níquel-zinco e de cobre-níquel
H	vermelha	60	esfera aço 3,175 mm	80 a 100 HRH	Alumínio, zinco, chumbo
K	vermelha	150	esfera aço 3,175 mm	40 a 100 HRK	Metais de mancais e outros muito moles ou finos

Fonte: SOUZA (1982)

Observa-se a diferença entre análises de dureza superficial com o método Rockwell, na tabela 5, examinando assim como na figura anterior as características para operação e interpretação do resultado do instrumento.

Tabela 5 - Tabela de Escala de Dureza Rockwell Superficial

ESCALA DE DUREZA ROCKWELL SUPERFICIAL E APLICAÇÕES					
ESCALA	COR DA ESCALA	CARGA MAIOR	PENETRADOR	FAIXA DE UTILIZAÇÃO	CAMPO DE APLICAÇÃO
15 N	preta	15	diamante cone 120°	65 a 90 HR 15N	Uso em aplicações similares às escalas HRC, HRA, HRD
30 N	preta	30	diamante	40 a 80 HR 30N	Uso em aplicações similares às escalas HRC, HRA, HRD
45 N	preta	45	diamante	35 a 70 HR 45N	Uso em aplicações similares às escalas HRC, HRA, HRD
15 T	vermelha	15	esfera aço 1,5875 mm	50 a 94 HR 15T	Uso em aplicações similares às escalas HRB, HRF, HRG
30 T	vermelha	30	esfera aço 1,5875 mm	10 a 84 HR 30T	Uso em aplicações similares às escalas HRB, HRF, HRG
45 T	vermelha	45	esfera aço 1,5875 mm	10 a 75 HR 45T	Uso em aplicações similares às escalas HRB, HRF, HRG

Fonte: SOUZA (1982)

O ensaio de dureza é conhecido pela rápida realização e pela pequena marcação deixada pelo penetrador na amostra, sendo considerado um ensaio não destrutivo (SOUZA, 1982).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo será descrito os métodos utilizados na coleta de dados para a realização deste trabalho de conclusão de curso, incluindo a caracterização e delimitação da pesquisa, as técnicas utilizadas e os instrumentos utilizados para a obtenção dos dados.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Quanto a área do conhecimento, conforme definidas pelo CNPq (2020), este trabalho se situa na grande área das engenharias denominada Engenharia Mecânica, dentro da subárea Mecânica dos Sólidos, no ramo da Mecânica dos Corpos Sólidos, Elásticos e Plásticos, especificamente na área de Análise de Tensões.

Quanto à finalidade, o trabalho classifica-se como sendo uma pesquisa básica estratégica, uma vez que, conforme Gil (2010), o tipo de pesquisa assim denominado pretende “aquisição de novos conhecimentos direcionados a amplas áreas com vistas à solução de reconhecidos problemas práticos” (GIL, 2010, p. 27). Uma vez conhecendo as propriedades dos materiais em análise, solucionando as questões quanto as aplicabilidades de produtos oriundos de processos de produção de manufatura aditiva.

Quanto aos métodos empregados, classifica-se a mesma, ainda conforme a subdivisão estabelecida por Gil (2010), referente a natureza dos dados, como uma pesquisa qualitativa, uma vez que nos interessa neste Trabalho as atribuições de caráter, propriedades ou características dos elementos estudados. Quanto ao ambiente em que os dados serão coletados, o trabalho será de laboratório, pois trata-se de pesquisa onde, em local controlado, se experimentam fórmulas, proporções ou combinações de dados que irão intervir no resultado final. A pesquisa baseia-se em estudos de análises de tensões e deformações, ensaio de dureza e metalografias, de materiais provenientes de processos distintos. Tem-se o objetivo de entender se a influência de ambos materiais e as suas características em função de prototipagens e produção final. Quanto ao grau de controle das variáveis, será uma pesquisa experimental, a qual conforme Gil (2010) é conceituada como “Onde cada experimento é constituído de variáveis cujos valores são mantidos constantes e o pesquisador examina a interferência das mesmas em outras variáveis, foco da

observação” (GIL, 2010, p. 28), pois esta pesquisa irá caracterizar através de corpos de prova de aço *Maraging* e AISI D6, submetidas a ensaios de tração, visando observar coeficientes de elasticidades, plasticidade e tenacidade e limites de resistência, posteriormente analisar suas composições e comportamento dos grãos com análises metalográficas e por fim ensaios de dureza.

Quanto aos objetivos, enquadra-se esta pesquisa dentro do tipo denominado pesquisa descritiva, pois tendo em vista o que afirma o mesmo autor, este é o tipo em que “Identificar possíveis relações entre variáveis” (GIL, 2010, p. 27), o que está em sintonia com o que pretende este Trabalho, uma vez que serão coletados os dados de amostras dos aços propostos em instrumentos utilizados em laboratório, realizando uma análise estratificada e interpretando dos resultados. Ainda dentro desta subdivisão, a coleta de dados se dará através de levantamento de campo, que é descrito por Martins Junior (2008), como “Contato maior com a população pesquisada a fim de verificar a ocorrência de algum fenômeno que estaria influenciando sobre a mesma ou a fim de realizar alguma experiência com a sua participação”. (MARTINS JUNIOR, 2008, p. 59)

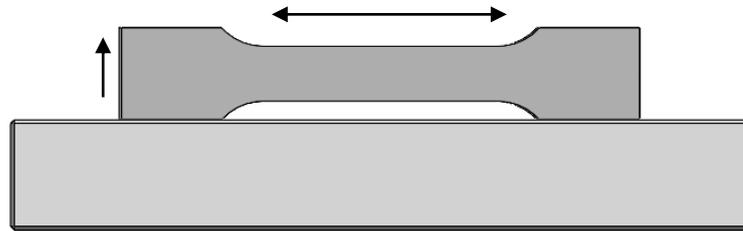
3.2. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DA COLETA DE DADOS

As técnicas e instrumentos que serão utilizados neste trabalho tem a intenção de obter resultados para a análise comparativa entre os dois materiais em questão.

3.3. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras de Aço *Maraging*, são de geometria planar, conforme norma ABNT NBR ISO 6892. Os parâmetros de impressão foram definidos através das recomendações do fabricante do equipamento de MA. Também, separada a matéria prima a ser sinterizada pelo equipamento, segundo certificação do fabricante, para que não haja influência de quaisquer alterações no estudo. As amostras foram produzidas no sentido que mostra a figura 9.

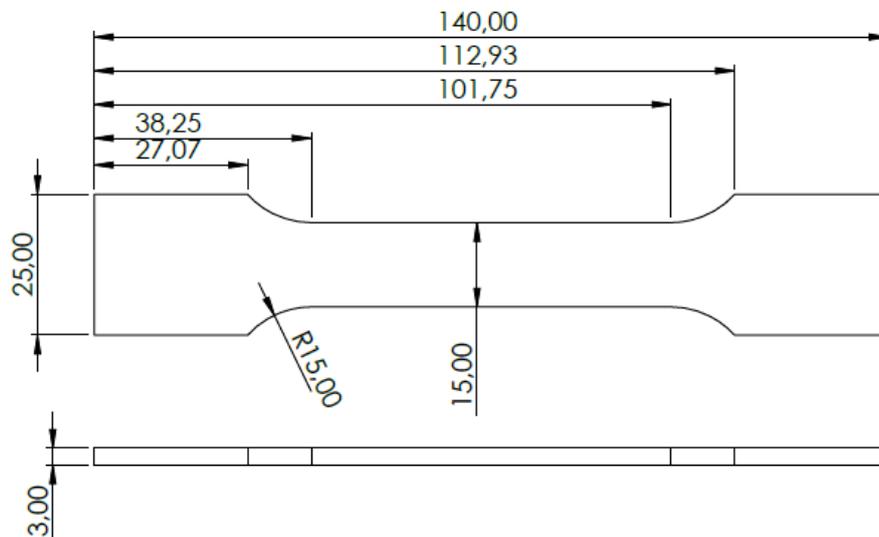
Figura 9 - Esquemático Sinterização Corpo de Prova Maraging



As amostras de Aço AISI D6, são provenientes do processo de laminação mecânica ou forjamento, comercializadas no mercado. São de geometria planar, conforme norma ABNT NBR ISO 6892. Será executado o processo de usinagem da matéria prima com fresamento para se chegar na geometria necessária do estudo.

As amostras seguirão o seguinte desenho, figura 10, baseado na norma ABNT NBR ISO 6892:

Figura 10 – Projeto de Corpo de Prova



O equipamento utilizado para o processo de manufatura aditiva foi: 3D SYSTEMS DPM FLEX 350. O material utilizado tem origem do fabricante: *LaserForm Maraging Steel (A)*. A figura 11 ilustra o equipamento utilizado.

Figura 11 - Impressora 3D SLS



Fonte: 3DSYSTEMS (2022)

O equipamento para usinagem das amostras do aço D6 foi utilizado uma fresadora ferramenteira, marca Clever. Figura 12 ilustra o equipamento utilizado.

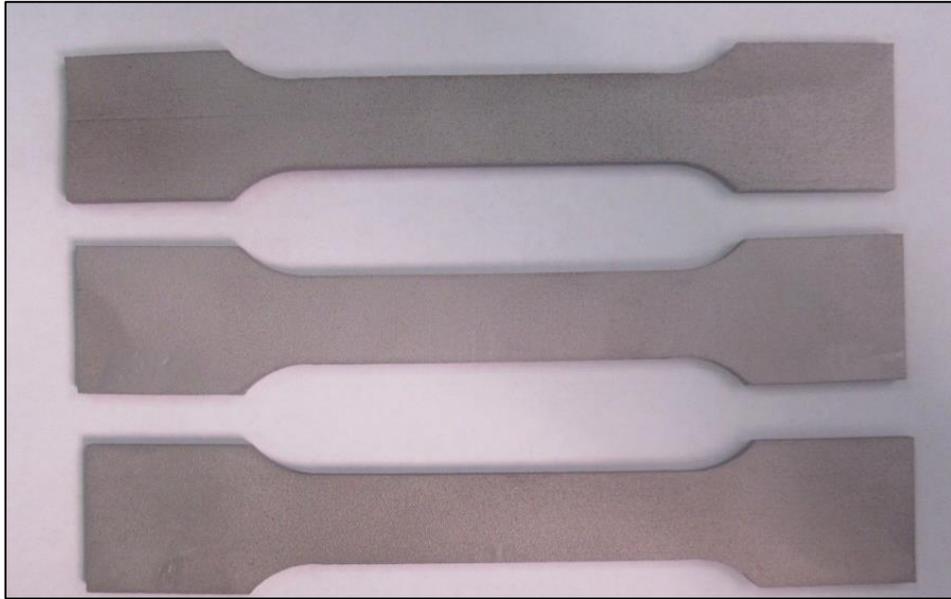
Figura 12 – Fresadora Ferramenteira Clever



Fonte: CIMHSA, 2022

Na figura 13 estão representadas as amostras produzidas via processo de Manufatura Aditiva de sinterização à laser com aço *Maraging*, conforme projeto.

Figura 13 – Amostras Aço Maraging Manufatura Aditiva



Na figura 14, estão representadas as amostras de AISI D6 obtidas de chapa 3mm e processadas por fresamento, com remoção de material por ferramenta de corte para a obter a região de útil, conforme indica-se na norma ABNT NBR ISO 6892.

Figura 14 - Amostras Aço AISI D6



3.3.1. ENSAIO DE TRAÇÃO

Todas as amostras foram submetidas a análise em equipamento de ensaio de tração da marca INSTRON, gerados os devidos gráficos de tensão x deformação de cada amostra dos respectivos materiais. A figura 15 mostra o equipamento utilizado nesse processo.

Figura 15 – Equipamento de Ensaio Tensão Deformação



3.3.2 ANÁLISE METALGRÁFICA

As amostras submetidas ao ensaio de tração, posteriormente foram identificadas e encaminhadas para análise referente ao comportamento dos grãos, procurando-se entender as porcentagens de perlita, ferrita e cementita de ambos os materiais.

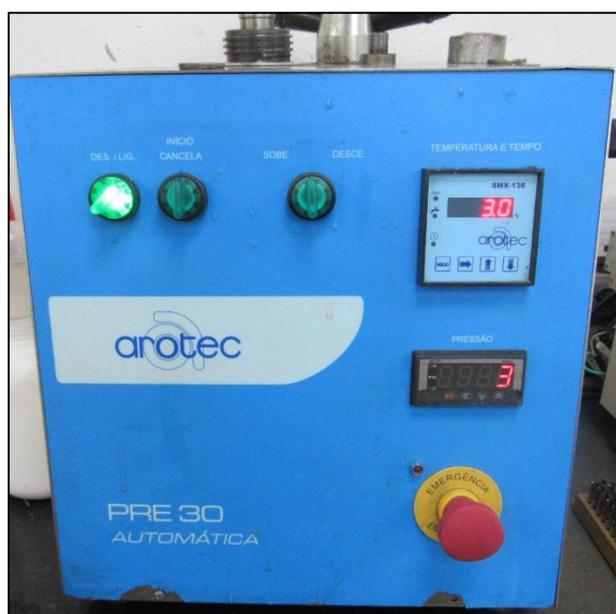
Essas amostras foram devidamente cortadas mecanicamente e transversalmente com o auxílio de uma cortadora metalográfica, figura 16, marca Teclago, modelo CM40/60-VV.

Figura 16 - Cortadora Metalográfica



Após os cortes, foram dispostas as frações das amostras e cobertas por baquelite em uma embutidora marca Arotec, modelo Pre 30 (Figura 17).

Figura 17 - Embutidora Arotec



Após os cortes e embutimento de baquelite, iniciou-se o processo de polimento das amostras, onde utilizou-se lixas com as respectivas granulometrias: 180, 220, 600, 2000.

A figura 18 mostra a politriz utilizada no processo, marca Teclago. Também foi utilizado pasta de alumina (Al_2O_3) e tecido de polimento para realizar o processo de polimento das amostras (ASTM, 2017).

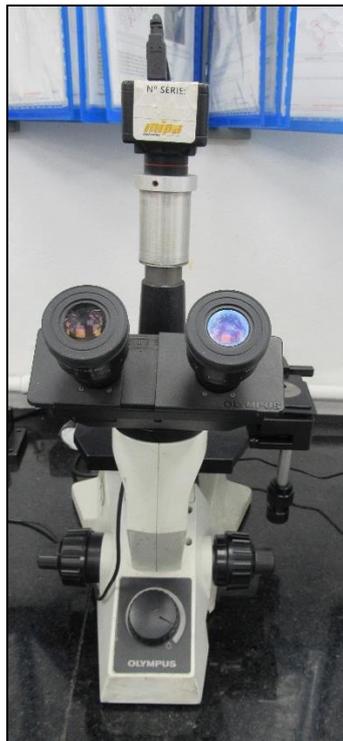
Figura 18 - Politriz Teclago



As amostras foram atacadas com a mistura de 3ml de ácido nítrico (HNO_3) e 90 a 95 ml de álcool etílico ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), de modo direto por 5 minutos. Após limpas com água corrente.

As amostras preparadas foram dispostas no microscópio, da marca Olympus (Figura 19) para posterior análise.

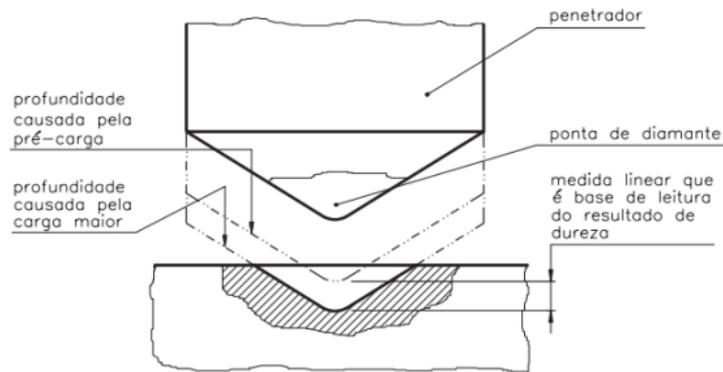
Figura 19 - Microscópio para Metalografia



3.3.3. ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL

Por último as amostras foram submetidas a ensaios de dureza Rockwell, figura 20, em equipamento da marca Wilson, em escala HRc, utilizando-se penetrador cônico de diamante 120°.

Figura 20 - Representação Esquemática Ensaio Rockwell



Fonte: SENAI (2018).

Realizando uma pré-carga de 10 kgf e após uma carga de 150 kgf. Figura 21 mostra o equipamento utilizado.

Figura 21 - Durômetro Wilson



4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Realizando o processo metodológico proposto, afim de se obter resultados experimentais científicos válidos, esta seção apresenta os valores encontrados para cada etapa e as análises necessárias para a compreensão do resultado final da pesquisa.

4.1. ENSAIOS DE TRAÇÃO

A tabela 6 e tabela 7 demonstram os resultados obtidos nos ensaios de tração dos materiais AISI D6 e Aço *Maraging* para os corpos de prova na condição inicial, assim como respectivas medias aritméticas.

Tabela 6 – Ensaio AISI D6

AMOSTRA	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	ALONGAMENTO (%)
1	795,68	793,63	0,84
2	784,24	784,05	1,18
3	507,14	507,14	0,44
MÉDIA	695,69	694,94	0,82

Tabela 7 – Ensaio Aço *Maraging* Manufatura Aditiva

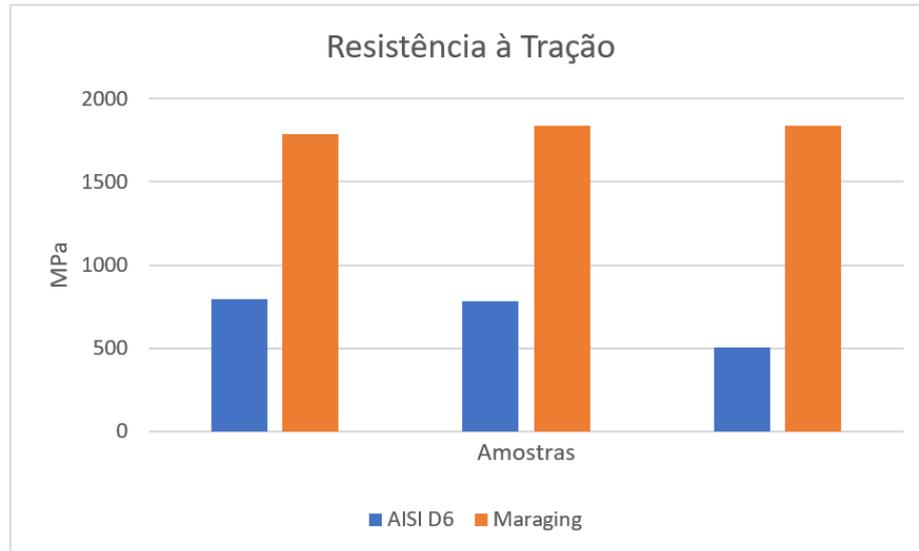
AMOSTRA	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	ALONGAMENTO (%)
4	1785,65	1548,79	2,55
5	1838,33	1195,69	4,84
6	1837,32	1006,93	4,64
MÉDIA	1820,40	1250,47	4,01

Observa-se os altos índices de resistência à tração e a tensão de ruptura nas amostras de aço *Maraging* em relação ao AISI D6, principalmente na propriedade de resistência a tração a qual apresentou, na média, em torno de 2,6x mais resistência a essa característica, apresentando também a tensão de ruptura, na média, em torno de 1,4x mais resistente a romper. Deve-se ter em mente que o

aço AISI D6 é conhecido e classificado como um aço frágil, justificando os resultados e a geometria apresentada nas amostras após o estudo no instrumento.

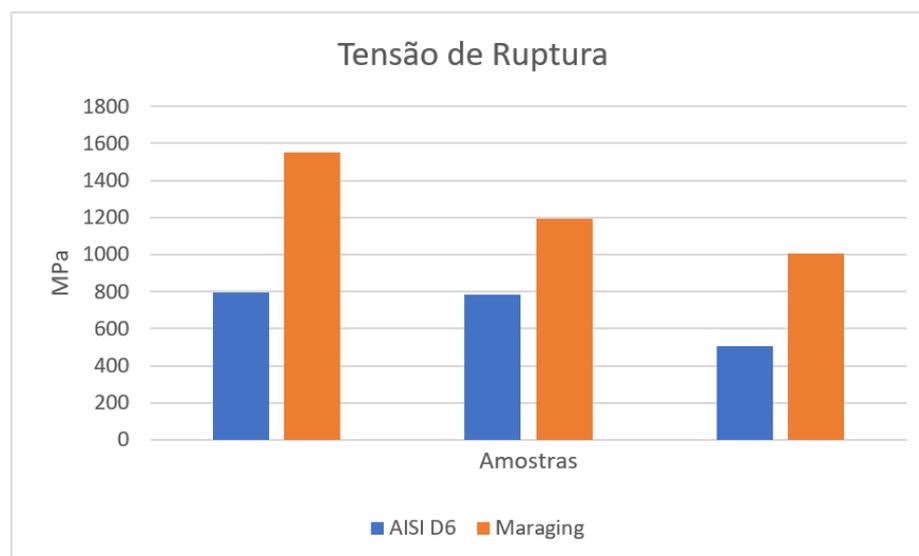
O gráfico 3 representa a diferença encontrada entre os resultados em relação a resistência à tração.

Gráfico 3 – Diferença dos Resultados em Resistência à Tração



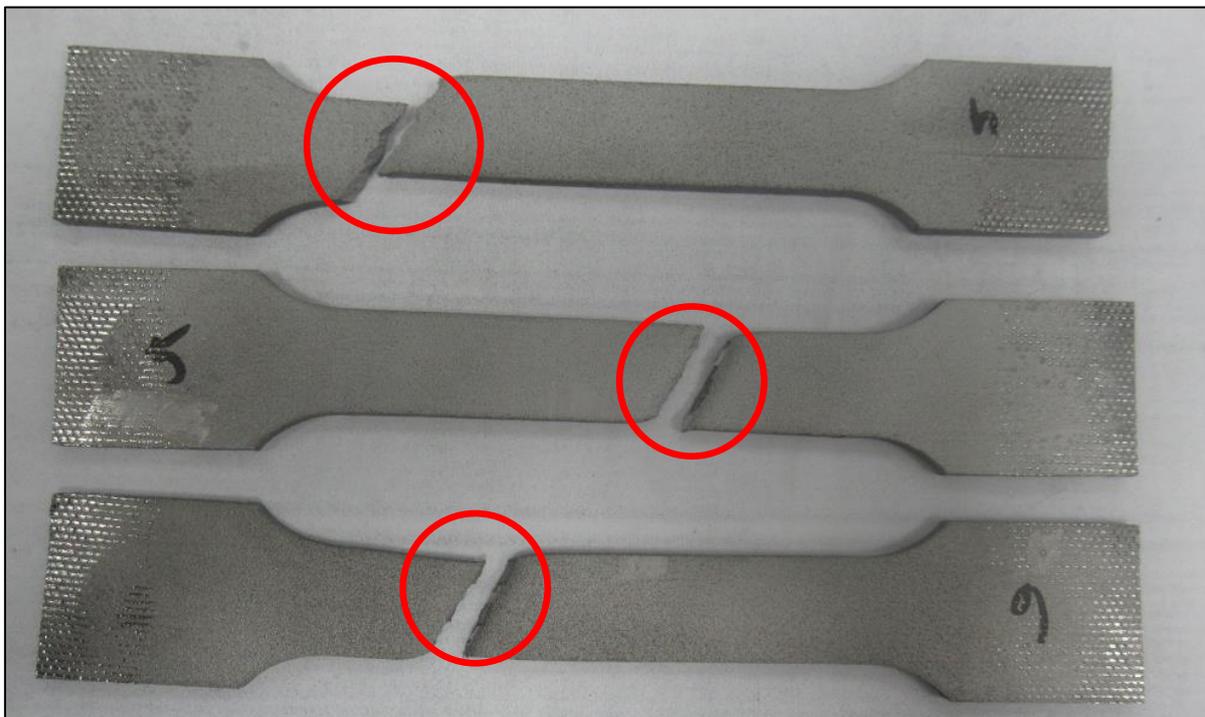
O gráfico 4 representa a diferença encontrada entre os resultados em relação a tensão de ruptura durante a realização dos ensaios.

Gráfico 4 - Diferença dos Resultados em Tensão de Ruptura

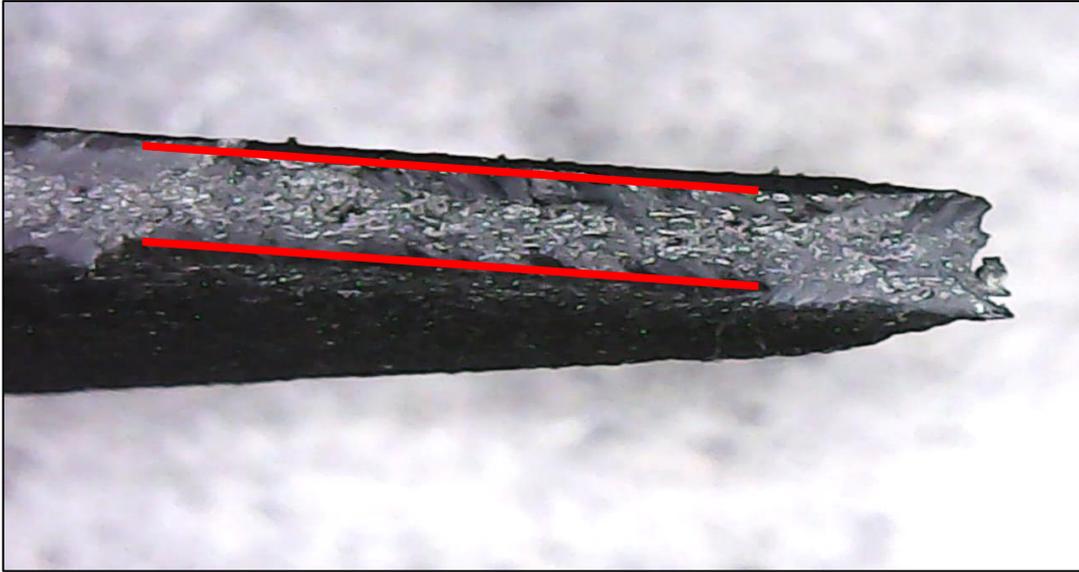


Na figura 22 está representado os corpos de prova do material Aço *Maraging* proveniente de MA utilizado para o ensaio de tração em condição de estrição.

Figura 22 - Corpo de Prova Maraging



É possível notar a diferença na deformação do corpo de prova na região de estrição, que durante o ensaio formou-se um pescoço nas amostras de *Maraging*, regiões circuladas em vermelho, em decorrência do escoamento do material durante o processo de estrição. Isso caracteriza a diminuição de área até o rompimento de material, e a capacidade do material em suportar altas deformações antes da ruptura. Na figura 23 está a vista frontal a região de ruptura, utilizando microscópio digital.

Figura 23 – Fotografia Microscópica Corpo de Prova Aço *Maraging*

Na figura 23, observa-se uma região de redução da área de material da parte útil do corpo de prova em decorrência do escoamento de material durante o ensaio, conforme descrito na revisão de literatura, pode se utilizar a figura 4 como referencial para análise do corpo prova após o rompimento no equipamento de tensão x deformação.

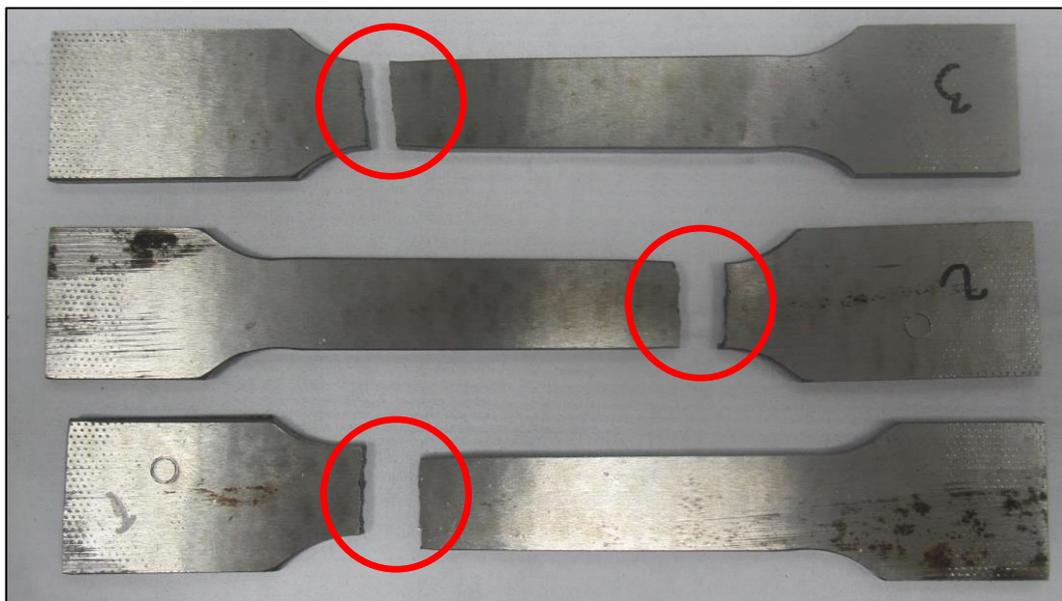
Uma outra observação importante é quanto a ductibilidade, que é a propriedade mecânica que representa o quanto esse material suporte em decorrência da aplicação de tração até sua ruptura, através da ductibilidade pode-se determinar se um material é frágil ou não, neste caso o corpo de prova do aço *Maraging* apresentou deformações, porém ao romper constatou diversas arestas pontiagudas na região fraturada, do qual pode ter sido ocasionada por micro vazios durante o cisalhamento, conforme pode ser observado na figura 24.

Figura 24 - Fotografia Microscópica Corpo de Prova Aço *Maraging*



Na figura 25 está representado os corpos de prova do material AISI D6 utilizado para o ensaio de tração em condição de estrição.

Figura 25 - Amostras AISI D6



Nos corpos de prova do aço AISI D6 observa-se a inexistência de pescoço nas regiões de fratura, classificando como uma fratura frágil. Os gráficos 5 e 6, respectivamente, são os gráficos de engenharia dos ensaios.

Gráfico 5 - Força x Deslocamento Maraging MA

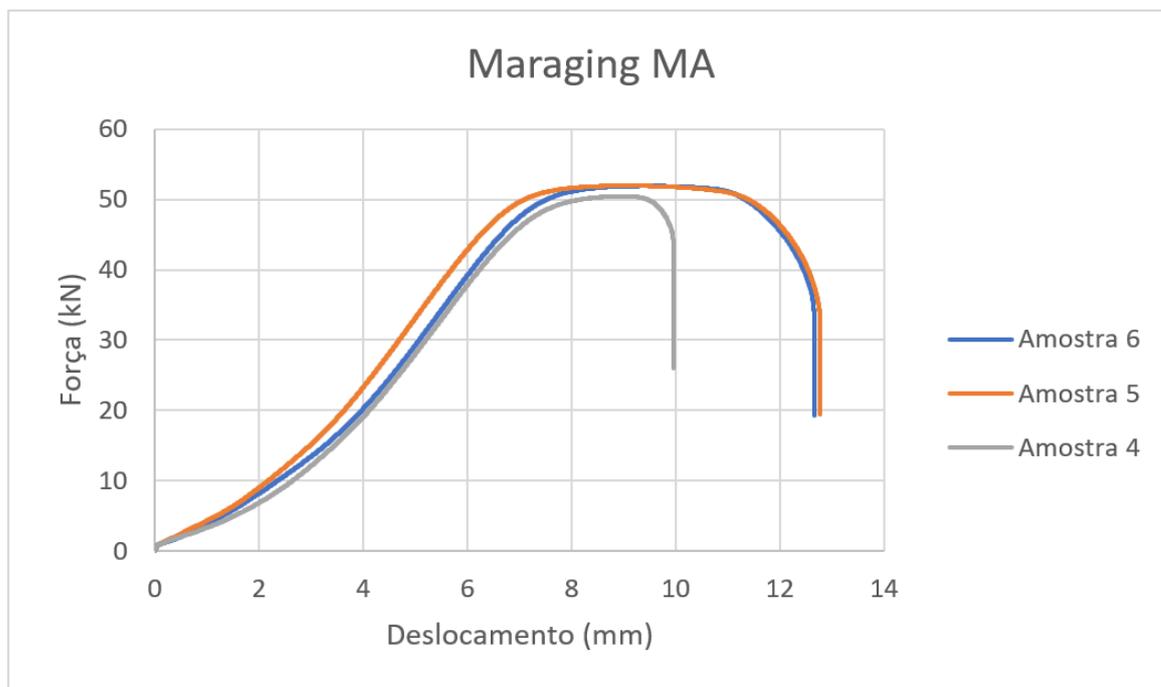
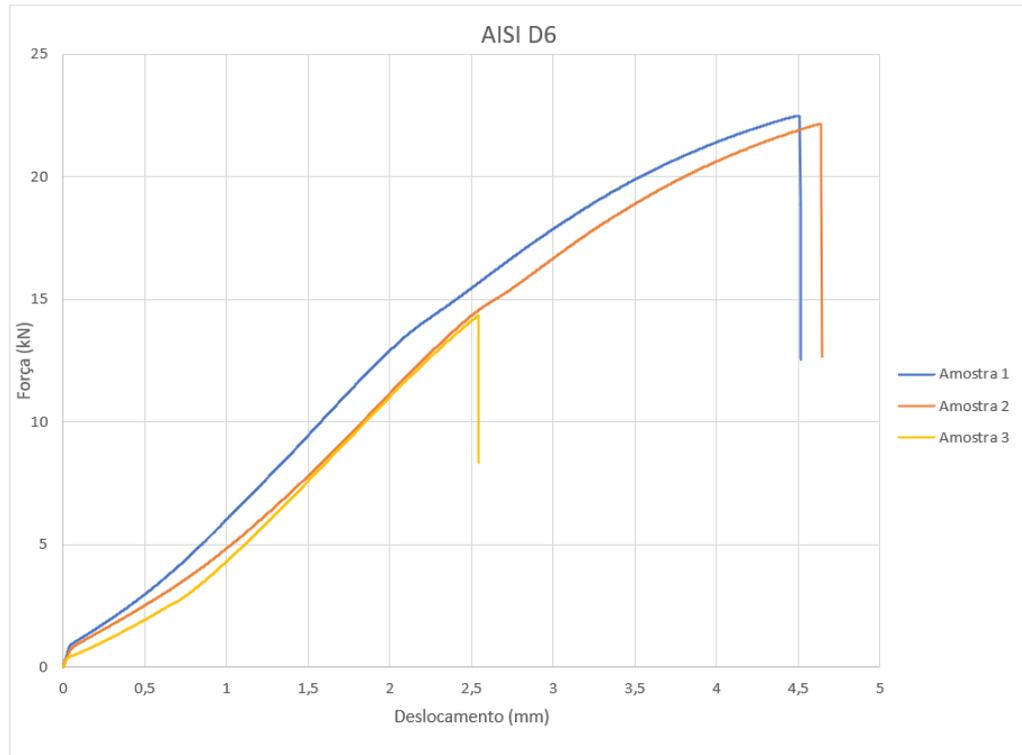


Gráfico 6 - Força x Deslocamento AISI D6



Examinou-se que não houve tensão de escoamento das amostras de número um, dois e três e isso justifica-se através de dois principais fatores. O primeiro é a proximidade dos índices de resistência à tração e tensão de ruptura, demonstrados na tabela 6, do qual as taxas são muito próximas indicando que o momento de ruptura acontece logo após a tração máxima ser exercida, e o segundo observa-se na figura 25, a ausência de diminuição de área na região de ruptura dos corpos de prova, característica do material, também em relação a esse material observa-se baixíssima taxa de alongamento.

No aço *Maraging*, proveniente de MA, percebe-se algumas características significativas, como:

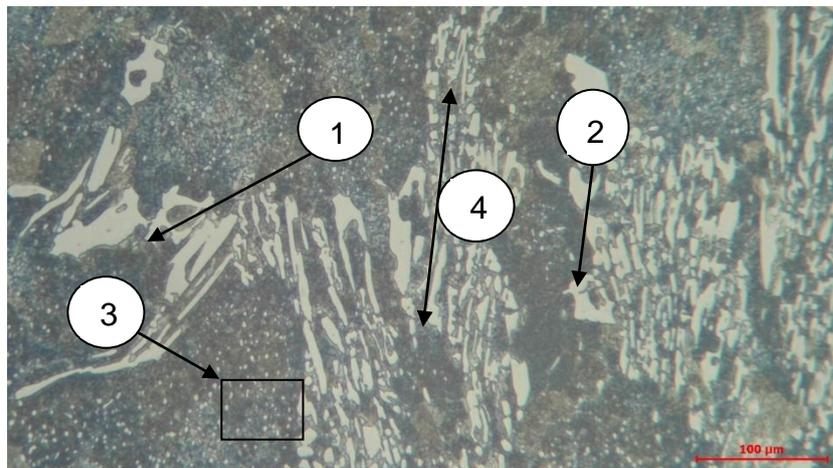
- Elevados valores para resistência a tração;
- Apresenta módulo de elasticidade em torno de $E = 170$ GPa. Próximo do módulo de elasticidade do aço proveniente de meios de fabricação já conhecidos.
- Pode-se definir como um material tenaz.

4.2. ANÁLISES METALGRÁFICAS

Com base nas imagens obtidas pelo método de metalografia, tem-se o objetivo de identificar a organização dos grãos e seus microconstituintes, também analisar as microestruturas do aço *Maraging*, proveniente de manufatura aditiva e do AISI D6.

A figura 26 é uma imagem microscópica do AISI D6.

Figura 26 - Imagem de Metalografia AISI D6

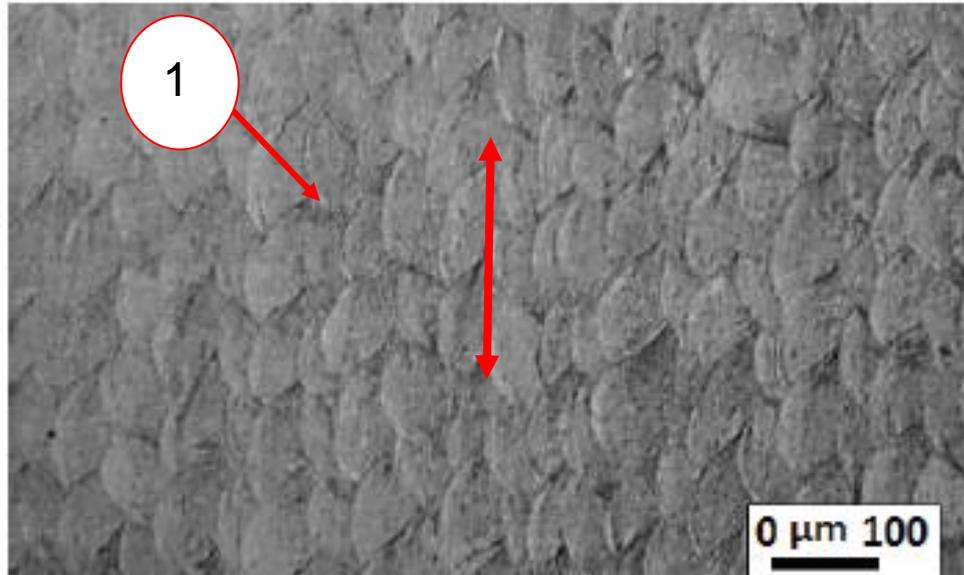


No AISI D6 em ampliação de 100x, observa-se contornos de ferrita (1), com áreas de perlita (2) e matrizes de perlita (3). Pode se observar também o sentido da laminação da amostra em questão (4).

Já nas amostras de Aço *Maraging* proveniente de MA, não se obteve sucesso com ataque de Nital como proposto em referencial teórico. Também foi testado ataques com o reagente de Vilella, mas sem sucesso. Esse fato pode ser justificado pela ausência de carbono na composição química do material.

A imagem microscópica do aço *Maraging* produzido via MA fornecida pelo fabricante do equipamento e do material, está representada na figura 27.

Figura 27 - Micrografia Aço Maraging MA



Fonte: 3DSystems (2022)

Com ampliação de 100x, na figura 27, observa-se os contornos do processo de sinterização do pó metálico depositado (1) muito semelhantes a um processo de soldagem convencional. Uma outra vantagem que se nota para o processo de manufatura aditiva é a escolha do sentido da sinterização, beneficiando em alguns casos situações relacionadas à fadiga. Outra característica que chama a atenção é a homogeneização do pó metálico para o regime sólido sinterizado.

4.3. ENSAIOS DE DUREZA

Os ensaios de dureza foram executados em todas as amostras dos dois materiais em análise obtendo resultados esperados, conforme normas e especificações do fabricante no caso do aço *Maraging*.

Para obtenção do valor de dureza, cada amostra foi medida três, somando e condicionando a uma média aritmética simples.

Os resultados do ensaio de dureza, estão descritos na tabela 8.

Tabela 8 - Tabela Ensaio de Dureza Rockwell

Material	Amostra	Dureza HRc
AISI D6	1	21
AISI D6	2	25
AISI D6	3	26
<i>Maraging</i>	4	36
<i>Maraging</i>	5	39
<i>Maraging</i>	6	37

Observa-se na tabela 8, uma variação de maior dureza do AISI D6. Porém segundo documento técnico de produto, condiciona-se a dureza máxima de 255HBW (Villares Metals, 2018), ou em conversão 25HRC. Considerando uma média a avaliação encontra-se dentro da normalidade.

Quanto ao Aço *Maraging* proveniente de MA, observa-se uma variação menor, quando considerado o cálculo utilizado no estudo. A variação de dureza está de acordo com o que estabelece o fabricante, caracterizando um processo estável no que se considera para ensaios de dureza, em relação ao processo de laminação ou forjamento decorrente do aço AISI D6.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido uma análise em relação a materiais provenientes de processos diferentes, com o objetivo de entender qual a relação entre a diferença que um corpo de prova construído por MA (Aço *Maraging*) e um corpo de prova de um material proveniente de laminação ou forjamento (AISI D6).

Assim, foi utilizado a metodologia de construção de corpos de prova provenientes dos distintos meios de fabricação e estes foram submetidos a ensaios, conforme citado acima neste trabalho.

O material Aço *Maraging* proveniente de MA tem um padrão de dureza e propriedades mecânicas relacionadas a limites de resistência e escoamento de pouca variação.

O material Aço *Maraging* proveniente de MA entrega elevadas resistências a tração, tensão de ruptura e alongamento. Em torno de 2,6x mais resistente e 1,4x mais resistente ao rompimento que o AISI D6. Caracterizando um aço com propriedades extremamente elevadas, que devem ser observadas na construção de protótipos com o material *Maraging*, das quais pode considerar apenas características funcionais. Características de propriedades mecânicas relacionadas a esforços mecânicos (resistência à tração) não devem ser considerados, pois as características do aço *Maraging* não possuem relação com AISI D6.

O material Aço *Maraging* proveniente de MA mostra uma construção de microestrutura diferente do habitual visto em materiais provenientes de forjamento e laminação.

Os aços AISI D6 e *Maraging* proveniente de MA não compartilham de similaridades diretas em relação aos ensaios de tração x deformação, dureza e metalografia.

Desta maneira, atingiram-se os resultados propostos neste trabalho, pelo qual foi possível avaliar as principais características dos aços analisados. Embora deva-se atentar-se a validação dos mesmos quando produzidos por manufatura aditiva, o trabalho se propôs a ampliar os conhecimentos referente ao aço *Maraging* proveniente de manufatura aditiva, afim de torná-lo visado para a fabricação de protótipos e componentes funcionais para diversos seguimentos.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros existem pontos ainda inexplorados referente a Manufatura Aditiva SLS, portanto deixa-se como sugestão os seguintes itens:

- Realizar as análises comparativas com outros tipos de materiais buscando uma similaridade.
- Realizar as análises comparativas entre os tipos de aço disponíveis para a Manufatura Aditiva.
- Estudo de variabilidade da microestrutura na construção de protótipos via Manufatura Aditiva SLS.
- Estudo de tratamentos térmicos em componentes obtidos através de Manufatura Aditiva SLS.

REFERÊNCIAS

ABNT [Associação Brasileira De Normas Técnicas]. NBR ISO 6892. **Ensaio de Tração**. Método de Ensaio à temperatura ambiente. 1ª Ed. Rio de Janeiro, 2013

ABNT [Associação Brasileira De Normas Técnicas]. NBR NM 122-1. **Aços Ferramentas – Parte 1: Classificação, Designação e Composição Química**. 2ª Ed. Rio de Janeiro (RJ), 2005.

ASM International. ASM Handbook, **Metallography and Microstructures**, vol. 9, Ohio, 2004.

BETIM, D. V. et al. **Análise de cenários prospectivos: um estudo sobre a manufatura aditiva no Brasil em 2024**. XVI SEGeT. Número 1 (2019). Disponível em: https://www.researchgate.et/publication/337669937_Analise_de_cenarios_prosp_ectivos_um_estudo_sobre_a_manufatura_aditiva_no_Brasil_em_2024)

BHAVAR, V. *et al.* A review on powder bed fusion technology of metal additive manufacturing. **Additive manufacturing handbook**, P. 3-15. Dayton, Ohio 2017.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8ª Ed. 2012, Rio de Janeiro (RJ). LTC Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª Ed. São Paulo (SP). Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 1996.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4ª Ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2008

DE SOUZA, J. **Impacto da evolução da manufatura aditiva sobre o desenvolvimento de produto**. Dissertação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Mecânica, Especialização em Gestão do Desenvolvimento de Produto. Curitiba (PR). Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/19319/2/CT_CEGDP_2016_1_07.pdf

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

FERREIRA, M.F.S. **Ensaios de dureza Rockwell, Vickers, Brinell e Microdureza, ensaios de Tração e ensaio Jominy**. Relatório 1 de Laboratório de Materiais de Construção Mecânica. Belo Horizonte (MG), 2011. Disponível em: <https://www.labteste.com.br/ensaios-dureza-brinell-rockwell-vickers>

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo (SP): Atlas, 2010.

GRATTON, A. **Comparison of Mechanical, Metallurgical Properties of 17-4PH Stainless Steel between Direct Metal Laser Sintering (DMLS) and Traditional Manufacturing Methods**, Proceedings of The National Conference On Undergraduate Research (NCUR) 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/304800182_Comparison_of_Mechanical_Metallurgical_Properties_of_17-4PH_Stainless_Steel_between_Direct_Metal_Laser_Sintering_DMLS_and_Traditional_Manufacturing_Methods

GÜIZA, G. M. C. **Efeito Da Deformação A Quente Sobre A Microestrutura, Dureza E Cinética De Precipitação De Um Aço Maraging C300**. Tese (Doutorado) – Pós Graduação de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/169547/338223.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 5ª Ed. São Paulo (SP): Editora Pearson Prentice Hall, 2004.

INÁCIO, D. *et al.* **A importância da manufatura aditiva como tecnologia digital para a indústria 4.0: uma revisão sistemática**. Revista Competitividade e Sustentabilidade -ComSus, 2020. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/comsus/article/view/23861/pdf>

MAGNÉE A.; DRAPIER J. M.; DUMONT J.; COUTSOURADIS D.; HABRAKENL. **Cobalt Containing High-Strength Steel**. Bruxelles – Belgique: Centre D'information du Cobalt, 128p, 1974

PERINI, F. G. **Propriedades mecânicas e microestruturais de aços de alta resistência e baixa ligas soldados**, Dissertação Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Materiais. Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul (RS), 2008. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/315/Dissertacao%20Felipe%20Perini.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

SCHAEFFER, L. **Conformação de Chapas Metálicas**. 2º Ed – 2004, Porto Alegre (RS). Imprensa Livre

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. 6ª Ed – 2008, São Paulo (SP). Pearson Prentice Hall

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**, Fundamentos Teóricos e Práticos. 5ª Ed.1984, São Paulo (SP). Edgard Blücher

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto: **Aços e ligas especiais**. São Paulo (SP). Edgard Blücher, 2006.

SYSTEMS, Inc. 3D. **Datasheet Maraging Steel LaserForm® Maraging Steel (A)**. Disponível em: <https://www.3dsystems.com/sites/default/files/2017-11/3d-systems-laserform-maraging-steel-%28a%29-datasheet-en-a4-web-2017-11-03.pdf>

THOMAS D.; RAGHAVAN L. V. **3D Metal Printing Technology**, IFAC – Papers On Line, Volume 49, 2016. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2405896316325496?token=0B47CFE5FE E370B2FADE2A532045E1793334485C59DD5459E54ED84E38026A36268609513B A4995EC68481E722B21B18&originRegion=us-east-1&originCreation=20221127232108>

VILLARES METALS, **VC131 Aço para trabalho a frio**. Ficha Técnica AISI D6. Ed. 15, 2021. Disponível em: <https://www.villaresmetals.com.br/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Trabalho-a-frio/VC131>