

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

ARIANA FERNANDES ARANTES

Resistência ao desgaste do aço AISI H13 produzido por meio de Manufatura
Aditiva (MA) utilizando o processo *Laser Powder - Directed Energy*
Deposition (LP-DED)

São Carlos

2021

ARIANA FERNANDES ARANTES

Resistência ao desgaste do aço AISI H13 produzido por meio de Manufatura
Aditiva (MA) utilizando o processo *Laser Powder - Directed Energy
Deposition* (LP-DED)

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Edson Mariani

São Carlos

2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

A658r Arantes, Ariana Fernandes
Resistência ao desgaste do aço AISI H13 produzido por meio de Manufatura Aditiva (MA) utilizando o processo Laser Powder - Directed Energy Deposition (LPDED) / Ariana Fernandes Arantes; orientador Fábio Edson Mariani. São Carlos, 2021.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2021.

1. Manufatura aditiva. 2. Direct Energy Deposition. 3. Impressão 3D de metais. 4. AISI H13. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE AVALIAÇÃO OU APROVAÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato / Student: Ariana Fernandes Arantes
Título do TCC / Title: Resistência ao desgaste do aço AISI H13 produzido por meio de Manufatura Aditiva (MA) utilizando o processo Laser Powder - Directed Energy Deposition (LP-DED)
Data de defesa / Date: 02/12/2021

Comissão Julgadora / Examining committee	Resultado / Result
Professor Doutor Fábio Edson Marini (orientador)	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SMM	
Professor Titular Reginaldo Teixeira Coelho	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SEP	
Mestre Gustavo Satoru Takeya	Aprovado
Instituição / Affiliation: EESC - SMM	

Presidente da Banca / Chair of the Examining Committee


Professor Doutor Fábio Edson Mariani

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, em especial a minha mãezinha querida que sempre me apoiou e investiu nos meus estudos, aos meus irmãos, ao meu pai aonde ele estiver, tenho certeza que está orgulhoso de mim, ao meu companheiro que trabalhou enquanto eu estudava que me apoiou e confiou, à TODOS os professores que transmitiu seus conhecimentos e nos ensinou a como ser uma engenheira, e aos colegas que estiveram nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, professores, técnicos e colaboradores, pelos ensinamentos e oportunidades durante meu período na instituição, em especial meu orientador Prof. Dr. Fábio Edson Mariani que aceitou em me orientar e se dedicou a me auxiliar neste projeto, fazendo uma maratona no laboratório em curto período de tempo, à minha família que sem eles eu não estaria aqui, principalmente, à Lívia que me auxiliou em todos os momentos e por fim, à Deus que com sua sabedoria mostrou o meu caminho e iluminou meus passos.

EPÍGRAFE

*“Ninguém pode voltar atrás e fazer um novo
começo. Mas qualquer um pode recomeçar
e fazer um novo fim.”*

Chico Xavier

RESUMO

ARANTES, A. F. **Resistência ao desgaste do aço AISI H13 produzido por meio de Manufatura Aditiva (MA) utilizando o processo *Laser Powder - Directed Energy Deposition* (LP-DED).** 2021. 37 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

A Manufatura Aditiva (MA) é uma área de grande interesse para as universidades e indústrias, devido às novas propriedades de produto e capacidade de produção sustentável. Um dos principais processos de MA para a fabricação de peças metálicas é o LP-DED (*Laser Powder - Directed Energy Deposition*), que é baseado na deposição simultânea de pó metálico e feixe de laser em camadas, por meio de uma trajetória de deposição pré-definida em *software* CAM. Esse processo é comumente aplicado para reparo e reconstrução de componentes danificados e desgastados, como também na fabricação de novas peças em materiais de baixa usinabilidade. No entanto, durante a fabricação, a complexa atividade térmica das novas camadas e sua influência sobre o material recém depositado afeta a qualidade da deposição, tornando a reprodutibilidade das peças e a manutenção das propriedades microestruturais um desafio para a produção. Nessa premissa, o presente trabalho buscou estudar a deposição do aço AISI H13 por meio de LP-DED, avaliando-se a influência dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento nas características tribológicas, comparado com o aço AISI H13 obtido por meio do processo de fundição convencional. As amostras do aço foram submetidas a tratamentos térmicos de têmpera a 1030 °C e de revenimento a 550, 600 e 650 °C. Em seguida foram caracterizadas por meio de microscopia confocal a laser, ensaios de dureza Rockwell C e ensaios de desgaste micro adesivo do tipo esfera fixa. Foram obtidas microestruturas martensíticas com durezas entre 28 e 51 HRC. Verificou-se que para a menor temperatura de revenimento foram obtidas a maior dureza e a maior resistência ao desgaste. Os resultados evidenciaram que foram produzidas amostras com propriedades e microestruturas semelhantes entre os processos de fabricação LP-DED e fundição convencional. Este estudo pôde constatar a importância da manufatura aditiva em processos industriais, mostrando resultados plausíveis e similares em relação às propriedades mecânicas ao compará-los com os processos convencionais de materiais metálicos.

Palavras-chave: 1. *Manufatura aditiva* 2. *Direct Energy Deposition* 3. *Impressão 3D de metais* 4. *AISI H13*

ABSTRACT

ARANTES, A. F. **Wear resistance of AISI H13 steel produced by Additive Manufacturing (AM) using the Laser Powder - Directed Energy Deposition process (LP-DED).** 2021. 371 p. Monograph (Project Final) – São Carlos Engineering School, São Paulo University, São Carlos, 2021.

Additive Manufacturing (AM) is a field of high interest for universities and industry due to new product properties and sustainable production capability. LP-DED (Laser Powder - Directed Energy Deposition) is one of the main AM processes for manufacturing metal parts, which is based on the simultaneous deposition of metal powder and laser beam in layers through a deposition pre-defined path in CAM software. This process is usually used to repair and renovate damaged and worn components, and also to manufacture new parts in materials with poor machinability. However, the complex thermal activity of the new layers and its influence on the newly deposited material affects the deposition quality during manufacturing, making it a challenge to reproduce the parts and maintain the microstructure properties. In this context, the purpose of this research is to study the deposition of AISI H13 steel through LP-DED, assessing the influence of quenching and tempering heat treatments on the tribology features, in comparison to AISI H13 steel obtained through the conventional casting process. The steel samples have been put through to quenching at 1030 °C and tempering at 550, 600, and 650 °C. They have been characterized by laser confocal microscopy, Rockwell C hardness tests, and micro adhesive ball wear tests. Martensitic microstructures were observed through hardness between 28 and 51 HRC. A finding from this study is that for the lowest tempering temperature, the highest hardness and the highest wear resistances were obtained. The results have proved that samples produced similar properties and microstructures between the LP-DED manufacturing process and conventional casting. This study demonstrates the importance of additive manufacturing in industrial processing, showing reasonable and similar results concerning to mechanical properties when comparing them with conservative processing for metallic materials.

Keywords: 1. *Additive Manufacturing* 2. *Direct Energy Deposition* 3. *Metals 3D Printing* 4. *AISI H13 Steel*

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM – American Society for Testing and Materials
CAD – Computer Aided Design
DED – Direct Energy Deposition
FDM – Fused Deposition Method
HV – Hardness Vickers
ISO – International Organization for Standardization
MA – Manufatura Aditiva
SLM – Selective Laser Melting
SLS – Selective Laser Sintering

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1. Manufatura Aditiva	12
2.2. Processos de manufatura aditiva metálica	13
2.3. Processo MA DED – <i>Directed Energy Deposition</i>	15
2.4. Características do AISI H13	16
3. MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1. Deposição da amostra	21
3.2. Tratamento térmico de têmpera e revenimento	23
3.3. Análise microestrutural	25
3.4. Ensaio de dureza	26
3.5. Ensaio de desgaste microadesivo	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
CONCLUSÕES	34
REFERÊNCIAS	35

1. INTRODUÇÃO

Manufatura Aditiva (MA) é caracterizada pela utilização de equipamentos que fabricam objetos por meio de adição de material a partir de um modelo tridimensional (3D), obtido pelo sistema de CAD (*Computer Aided Design*). Essa técnica envolve o desenho de um componente camada por camada, formando o componente sem a necessidade de moldes ou outras ferramentas (GRESS; KALAFSKY, 2015).

Na década de 1980, surgiram máquinas de manufatura aditivas, como a máquina de prototipagem rápida - *rapid prototypings* (CAMPBELL; BOURELL; GIBSON, 2012). O termo prototipagem rápida parte da finalidade das máquinas em produzir protótipos tridimensionais de uma maneira rápida e generalizada (CAMPBELL; BOURELL; GIBSON, 2012). Atualmente, esses equipamentos têm uma gama maior de materiais, como plásticos, cerâmicas e ligas metálicas (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

As principais características da MA é a redução do número de etapas e processos para fabricar um objeto, economia de material e capacidade sem precedentes de combinar geometrias (GARRETT, 2014). Além da capacidade de produzir objetos com *design* complexos, torna-se economicamente viável as alterações de projeto para um pequeno lote de peças em velocidades mais rápidas e assim, fornece uma cadeia de logística simplificada (HOLMSTROM, 2010).

O processo de MA produz peças em cerâmicas, polímeros e metais, possuindo um amplo campo de aplicações, compreendendo os setores da medicina, aeronáutica e automobilismo (AHRENS; VOLPATO, 2007) (GUO; LEU, 2013) (LONGHITANO, 2015). Diversos métodos compõem a MA, porém, existem duas categorias que podem utilizar metais: *powder-bed systems* e *powder-fed systems* (ISAZA, et al., 2018).

Directed Energy Deposition (DED) é um dos processos que faz parte da categoria *powder-fed systems*, seu funcionamento envolve o uso de uma fonte de energia local para que a fusão do material e a construção/deposição da peça ocorra simultaneamente (YAKOUT, 2018). Esse método é atrativo para metais devido sua capacidade de produzir peças com dimensões próximas às projetadas, o que possibilita a exclusão de alguns processos de fabricação, tais como a furação e soldagem. Outra grande vantagem é permitir o monitoramento da temperatura da poça de fusão, facilitando o controle da transferência de calor e a redução de tensões residuais (SABOORIN, 2019).

Uma das ligas metálicas mais utilizadas para construção de componentes por meio de MA é o aço ferramenta AISI H13. Esse material é aplicado na fabricação de ferramentas de corte, moldes, dobramentos, matrizes e qualquer outra ferramen ta capaz de transformar um material em uma peça de uso bem definido, abastecendo os segmentos automobilístico, segmentos de peças, matrizes para

extrusão de alumínio e eletrônicos (SOARES JUNIOR, 2006). As principais características do aço AISI H13 são a elevada temperabilidade, resistência à deformação a altas temperaturas e boas resistências ao desgaste e ao impacto (VALES, 2010).

Em vista das características do aço AISI H13 e a importância que a MA vem desempenhando tanto na pesquisa quanto nas indústrias, desenvolver novos componentes que apresentem propriedades mecânicas semelhantes ou até superiores ao método convencional de fundição, é um passo importante para a ciência. Neste contexto, o objetivo deste trabalho consistiu na deposição do aço AISI H13 por meio de LP-DED, avaliando-se a influência dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento nas características tribológicas, comparado com o aço AISI H13 obtido por meio do processo de fundição convencional.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Manufatura Aditiva

Manufatura Aditiva (MA) é o conjunto de tecnologias de impressão 3D que permite criar objetos a partir do zero utilizando modelos digitais. Com ela, é possível produzir peças complexas otimizando recursos. A impressão em três dimensões permite que o produto seja produzido camada após camada utilizando somente o que é necessário de matéria-prima, com uma perda bastante reduzida que se resume ao material de suporte e calibração da máquina. Portanto, essa possibilidade chama a atenção de variados setores da economia, que enxergam formas de reduzir custos e a necessidade de poupar recursos naturais (3D LAB, 2021).

A MA ajudou a vencer não somente barreiras de custos, mas também de tempo e complexidade, o que mudou a forma como produtos são projetados, fazendo uma revolução no desenvolvimento e fabricação de produtos, o que permitiu a capacidade de criar modelos sob encomenda, eliminação de etapas de produção, customização em massa e aceleração do processo de desenvolvimento do produto (LIPSON; KURMAN, 2013) (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Todos os processos de MA precisam de um modelo em um software (ex.: *Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing – CAD/CAM*) para ser impresso. Esse programa analisa o desenho mecânico e fatia o modelo tridimensional em finas camadas, desenvolvendo assim uma estrutura rígida e com a menor quantidade de material possível. Com o auxílio do computador, a impressora vai gerando partículas da matéria prima, e dispondo-as em camadas finas até formar o objeto no formato desejado, no caso de impressoras por fusão e deposição (PINHEIRO *et al.*, 2018).

Em geral, a MA é composta de oito etapas entre o modelo digital em CAD/CAM e a peça final obtida, sendo divididas em: 1. Modelagem digital tridimensional em CAD/CAM; 2. Conversão para o arquivo no formato STL; 3. Transferência do arquivo para a máquina; 4. Setup da máquina; 5. Construção; 6. Remoção; 7. Pós-tratamento e; 8. Aplicação (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). Essas etapas são apresentadas de modo ilustrativo na Figura 1.

Figura 1: Etapas de fabricação da Manufatura Aditiva.



Fonte: (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

2.2. Processos de manufatura aditiva metálica

O desenvolvimento de lasers mais potentes e com preço mais acessível de *hardwares* e *softwares* de alto desempenho e a obtenção de pó metálico de alta qualidade permitiu um grande avanço nas tecnologias de manufatura para metais (DEBROY, 2018). Essa indústria vem apresentando números expressivos de crescimento, atuando em diversos setores como indústria aeroespacial, biomédica e automotiva (NGO, *et al*, 2018).

A norma ASTM F2792-12a classifica e divide em dois grupos os processos que podem depositar metais: *powder-bed systems* e *powder-fed systems* (ISAZA, *et al.*, 2018). A tecnologia *power-bed systems* constitui das seguintes técnicas: *Selective Laser Melting (SLM)*, *Laser Cusing and Direct Metal Laser (DLMS)* e *Electron Beam Melting (EBM)* (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010). Enquanto, os classificados como *powder-fed systems*, são: *Laser Cladding*, *Directed Energy Deposition (DED)*, *Laser Metal Deposition (LMD)* e *Laser Engineered Net Shaping (LENS)* (ISAZA *et al.*, 2018).

- *Powder-bed systems*:

- *Selective Laser Melting (SLM)*: esta técnica é aplicada em polímeros e cerâmicas. A intenção é obter propriedades mecânicas semelhantes às das matérias-primas utilizadas na fabricação tradicional. Ao atingir melhores propriedades mecânicas, é possível aumentar a usabilidade de membros em regiões sujeitas a altas tensões mecânicas. Porém, esse processo apresenta algumas limitações, sendo que a resposta de absorção do feixe de *laser* é diferente para cada material, levando a tensão

superficial e aumento da tensão térmica, que pode causar trincas. (YAKOUT *et al.*, 2018)

- *Laser Cusing and Direct Metal Laser (DLMS)*: ao contrário do método SLM, neste processo pode realizar a fabricação de peças com quase qualquer material metálico (DELGADO, 2012; DESIGNIFYING, 2018). Esta técnica envolve "espalhar" uma camada de pó metálico na superfície onde se deseja imprimir em 3D. O feixe de *laser* é então irradiado de tal forma que ocorre a sinterização do pó metálico, enquanto provoca a fusão parcial do pó metálico (CASTELLS, 2016). Sua vantagem consiste em não gerar muitas tensões internas residuais nos componentes e, assim, eliminar defeitos na estrutura interna das peças fabricadas(CASTELLS, 2016).
- *Electron Beam Melting (EBM)*: a impressão 3D por fusão de feixe de elétrons requer pré-aquecimento do pó metálico e um processo a vácuo. O pó metálico é fundido por meio de um feixe de elétrons. Este método é semelhante ao SLM, mas tem maior complexidade operacional e a impressora 3D é mais rápida ao imprimir componentes fabricados ao comparar com o SLM. (YA KOUT *et al.*, 2018).
- *Powder-fed systems*:
 - *Directed Energy Deposition (DED)*: processo pelo qual a energia térmica é utilizada na fusão dos materiais à medida que são depositados. E para gerar esta energia térmica é necessário um *laser*, um feixe de elétrons ou um arco de plasma (Gibson *et al.*, 2013)
 - *Laser Metal Deposition (LMD)*: esse método é dividido em duas partes, a primeira chamada de LMD-w (Laser Metal Deposition - Wire) e a segunda de LMD-p (Laser Metal Deposition - Powder), dependendo do método de deposição do material se é com o pó ou com o arame. No LMD-w, um feixe de *laser* funde o arame, onde é introduzido no foco do *laser* por meio de um alimentador. Já no LMD-p, o material é adicionado na forma de pó através do bocal (GRAF *et al.*; 2018).
 - *Laser Engineered Net Shaping (LENS)*: este processo é semelhante às tecnologias de prototipagem rápida iniciadas por *laser* tradicionais, como estereolitografia e sinterização seletiva a *laser*, em que técnicas de camada aditiva são usadas para fabricar peças físicas diretamente de dados CAD. Para gerar uma peça, utiliza-se a distribuição coordenada de partículas de metal em um feixe de *laser* focalizado. Este feixe cria uma poça de metal fundido no substrato no qual o pó é injetado. Simultaneamente, ocorre a deposição do substrato que é movido sob a região de

interação feixe-pó para produzir a geometria transversal desejada. Camadas consecutivas são posteriormente depositadas uma sobre a outra, criando assim, uma tridimensionalidade da peça impressa. (Griffith, 2011).

2.3. Processo MA DED – *Directed Energy Deposition*

Directed Energy Deposition (DED) é um dos principais processos entre aqueles usados na MA de materiais metálicos. Uma fonte de calor é manipulada usando movimento automatizado e um plano de caminho digital para depositar uma camada de material que representa a geometria da camada necessária. Uma única camada pode ser usada para adicionar material seletivamente para a restauração dimensional e muitas camadas subsequentes podem ser usadas para construir formas tridimensionais com sistema de movimentação de até 6 eixos (ASM International, 2020).

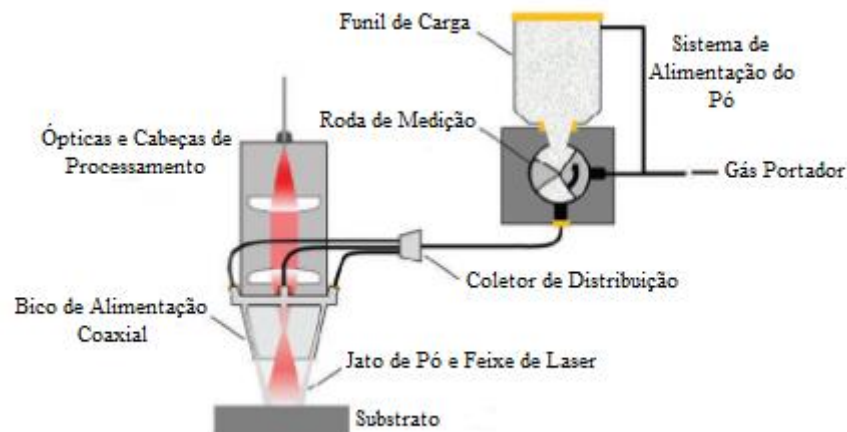
Geralmente as peças produzidas por meio do processo DED são consideradas *near-net shape*, pois a usinagem pós-processamento é quase sempre usada para alcançar dimensões e tolerâncias geométricas requeridas para componentes de engenharia.

O processo DED é capaz de realizar altas taxas de deposição e é relativamente fácil de mensurar para grandes volumes construídos. Outra característica é a sua capacidade de depositar múltiplas ligas desde que sejam metalurgicamente compatíveis. Esta faceta do DED é frequentemente usada para adicionar materiais de elevada dureza para melhorar localmente a resistência ao desgaste, bem como adicionar materiais que tenham melhores resistências à corrosão do que o substrato.

Outra característica do processo é que pode ser usado vários tipos de fonte para fundir e depositar material, dentre elas estão o laser, feixe de elétrons e arco elétrico.

Em relação ao laser, seu comprimento de onda está entre 1 mm e 1000 nm e o pó metálico que é usado, encontra-se entre 10 e 200 μm de diâmetro, para fornecer fluidez suficiente no sistema de alimentação do pó através do canal de alimentação e para o cabeçote de deposição. E por fim, utiliza-se um gás portador, geralmente um gás inerte como o argônio (raio laser ou arco elétrico) ou a vácuo (raios de elétron). Apresenta-se na Figura 2 um desenho esquemático do cabeçote e o sistema de alimentação utilizado no processo DED a laser.

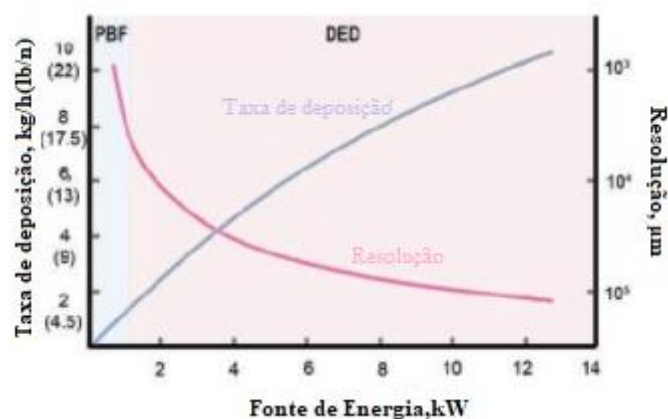
Figura 2: Desenho esquemático do cabeçote e sistema de alimentação do pó do processo DED a laser.



Fonte: ASM International, 2020.

Além do DED, outro processo muito utilizado para MA de metais é o *Powder Bed Fusion* (PBF), diferindo do primeiro conforme representado na Figura 3, onde é apresentada a diferença entre a taxa de deposição em relação a energia entre os processos.

Figura 3: Taxa de deposição em relação a energia entre os processos DED e PBF.



Fonte: ASM International, 2020.

2.4. Características do AISI H13

Os aços ferramentas são ligas de Fe-C com adições de elementos de liga, sendo uma das escolhas mais comuns para material dos moldes e matrizes (PERSSON,2005). Esses aços apresentam como principais características: elevada dureza e resistência a abrasão, bem como boa tenacidade e

manutenção das propriedades de resistência mecânica mesmo em altas temperaturas (GABARDO, 2008).

Estes aços são fabricados com controles de qualidade restritos para a composição química e a homogeneidade do material e são apresentados em pequenas quantidades ao ser forjado, usando metalurgia do pó em comparação com outros aços. Desta forma, são classificados a partir da sua aplicabilidade ou da propriedade metalúrgica. Na Tabela 1 são apresentadas as classificações e variedades de aços ferramentas (COSTA E SILVA, 2006).

Tabela 1: Classificação AISI dos aços ferramentas.

Tipos de aço ferramenta		Símbolo
Aços temperáveis em água ou resistentes ao choque	Aços temperáveis em água (<i>Water</i>)	W
	Aços resistentes ao choque (<i>Shock</i>)	S
Aços para fins especiais	Aços baixa liga (<i>Low alloy</i>)	L
	Aços para moldes	P
Aços para trabalho a frio	Aços temperáveis em óleo (<i>Oil</i>)	O
	Aços média liga temperáveis ao ar (<i>Air</i>)	A
	Aços alto carbono, alto cromo	D
Aços para trabalho a quente (H ot working)	Ao cromo	H1 – H19
	Ao tungstênio	H20 – H39
	Ao molibdênio	H40 – H59
Aços rápidos	Ao tungstênio	T
	Ao molibdênio	M

Fonte: Costa e Silva; Mei (2006).

Os fatores que determinam a qualidade do aço ferramenta são: homogeneidade da composição química e microestrutura, além que o uso da metalurgia do pó garante a eliminação da heterogeneidade da liga, o que é benéfico na produção das peças. (MEI, 2006).

Os aços ferramentas da família H são utilizados na fabricação de moldes, matrizes para extrusão e peças de máquinas, além de abastecer o segmento automobilístico e de construção mecânica (BACALHAU; RODRIGUES; MESQUITA, 2014; VALES, 2010). Dentre as ligas metálicas utilizadas para construção de componentes, destaca-se o aço ferramenta AISI H13 que é utilizado para trabalho a quente e em moldes para processos de fundição de alumínio e ligas de cobre (MAZUR *et al.*, 2017). Essa liga ferrosa possui em sua composição química carbono, cromo, molibdênio e vanádio. Após a têmpera e revenimento, apresenta excelentes propriedades mecânicas provenientes da microestrutura martensítica e formação de carbonetos (NING *et al.*, 2017). Essa liga apresenta boa tenacidade e resistência ao impacto a altas temperaturas e resistência ao desgaste, o que

garante uma boa aplicação tanto em trabalho a quente quanto a frio (VALES, 2010). Na Tabela 2 é apresentada a composição química nominal do aço AISI H13.

Tabela 2: Composição do aço AISI H13 em porcentagem de massa.

Elementos	Cr	Mo	Si	V	C	Mn
Porcentagem de massa	5,20	1,50	1,00	0,90	0,40	0,35

Fonte: Catálogo Villares Metals, 2006.

Na Tabela 3, apresenta-se as principais propriedades mecânicas dos aços AISI H13. Devido às suas propriedades, este aço é amplamente utilizado para moldes de fundição, extrusão e injeção de plástico.

Tabela 3: Propriedades mecânicas do AISI H13.

Propriedades mecânicas	Valores médios
Dureza Brinell	121 HB
Limite de resistência à tração	420 Mpa
Tensão de escoamento	350 Mpa
Módulo de elasticidade	200 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3

Fonte: Miranda, 2017.

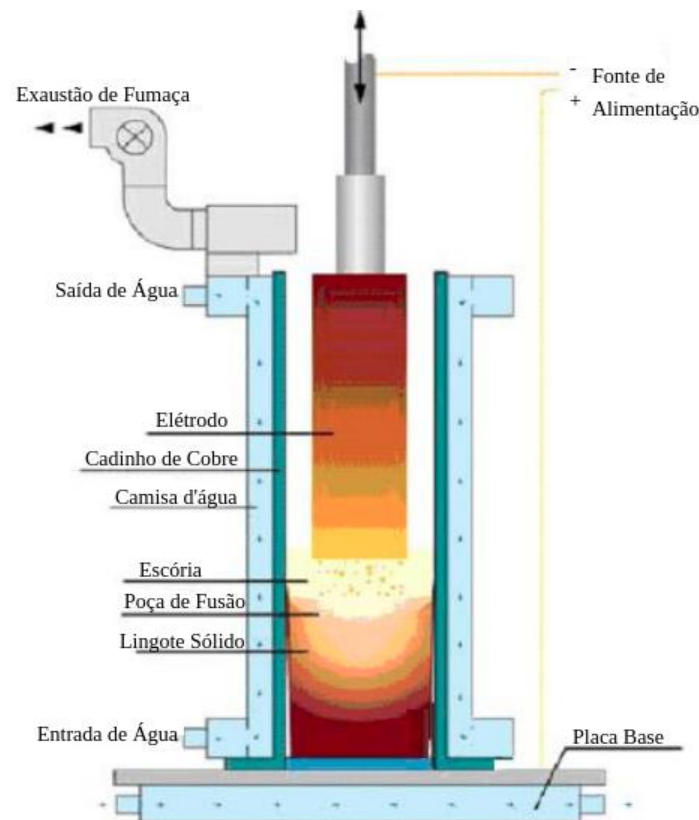
Na técnica convencional, as ferramentas de aços AISI H13 são fabricadas a partir do fresamento CNC, resultando em taxas de refugo, o que limita a geometria da matriz e recursos internos como canais de resfriamento do moldado. Os canais de resfriamento moldados são limitados a canais retos (WANG *et al.*, 2019). Em geral, os componentes de aço-ferramenta com canais de refrigeração diferentes dos canais retos são fabricados em peças separadas e soldadas. As soldas podem comprometer a integridade estrutural da peça por meio de ciclos termomecânicos. (DORFERT *et al.*, 2019).

O processo de fabricação do AISI H13 é pela refundição por eletroescória (ESR - *Electroslag Remelting*) e por VAR (*Vacuum Arc Remelting*). Estes processos são baseados na produção de barras de alta qualidade segundo o método VD (*Vacuum Degassing*) (KELKAR *et al.*, 2013).

O processo ERS utiliza um molde resfriado de água contendo escória e o lingote. O lingote é feito a partir de aquecimento de resistência passando uma corrente alternada entre o eletrodo e o cadinho, que derrete em banho de escória que foi super aquecida até que o metal fundido comece a

gotejar. Essas gotículas passam pela escória e refinam o metal líquido até que o fundo do molde se solidifica. Assim, permite uma solidificação mais controlada com melhor integridade estrutural do material, resultando em aço homogêneo e isotrópico (GABARDO, 2008; KELKAR *et al.*, 2013). O esquema do processo de fabricação ESR é mostrado como um exemplo na Figura 4.

Figura 4: Diagrama esquemático do processo ESR.



Fonte: Kelkar, 2003.

Apesar do processo mais utilizado de fabricação do AISI H13 ser o ESR, existem outros tipos de processo como a MA *Binder Jet* que vem recebendo destaque pela similaridade nos resultados com o processo convencional (NANDWANA, 2020). Em estudos anteriores, estes pesquisadores conduziram tentativas em experimentos com amostras de AISI H13 usando o processo de MA *Binder Jet*. Foram realizados processos de otimização onde foram obtidas propriedades comparáveis ao processo convencional, bem como valores de dureza semelhantes.

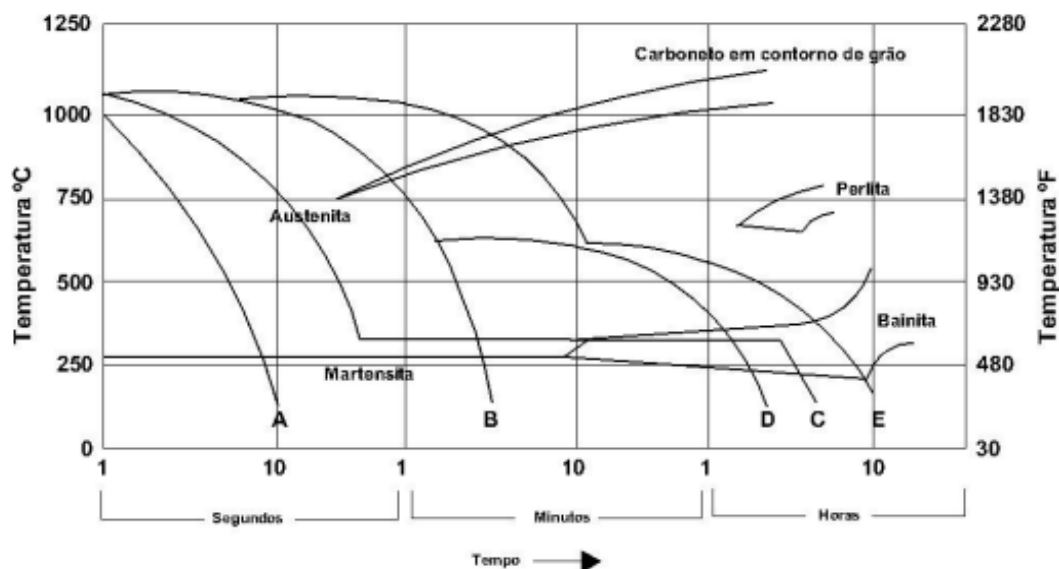
Embora o *Binder Jet* funcione bem para construção de componentes, pode não ser a melhor tecnologia para fazer componentes com canais, pois é limitado por superfícies ásperas que requerem tratamento de superfície significativo o que é difícil com características internas complexas (HOLZWEISSING *et al.*, 2015).

Os principais tratamentos térmicos realizados para o aço AISI H13, são o de têmpera e o de revenimento (LUCCHINI, 2005). Geralmente, o processo de têmpera utiliza um sistema uniforme de aquecimento até uma temperatura de 815 °C, no qual, a temperatura de austenitização se encontra entre 995 °C e 1025 °C por um período de 20 minutos e mais 5 minutos para cada 25 mm de espessura. Em seguida, resfria-se rapidamente em água ou óleo, entretanto, o óleo é o mais recomendado (LUCCHINI, 2005). Enquanto o tratamento de revenimento é o processo em que é realizado após a têmpera para alterar a estrutura e proporcionar alívio de tensões internas provenientes do resfriamento rápido (KANG *et al.*, 2014).

Após a têmpera, o aço AISI H13 precisa de dois revestimentos, ocorrendo a primeira precipitação secundária do carboneto, enquanto na segunda vez está a transformação de martensita que converteu o primeiro temperado em martensita temperada. Em alguns casos pode-se realizar um terceiro revenido com o objetivo de obter maior ductilidade e tenacidade do material (VALES, 2010).

Conforme observado na Figura 5, há curvas de transformação no resfriamento contínuo do aço AISI H13. Desta maneira, a curva A, obtém-se martensitas com maiores taxas de resfriamento. Já nas curvas B e E, observa-se também que se essa taxa diminui, forma-se uma precipitação de carboneto nos contornos de grão em alta temperatura (cerca de 750 a 900 °C) que é possível durante o processo de resfriamento, afetando a tenacidade do material. E por fim, nas curvas C, D e E são formadas bainitas, com ou sem precipitação de carboneto nos contornos do grão.

Figura 5: Curva de transformação sob resfriamento contínuo do aço AISI H13.

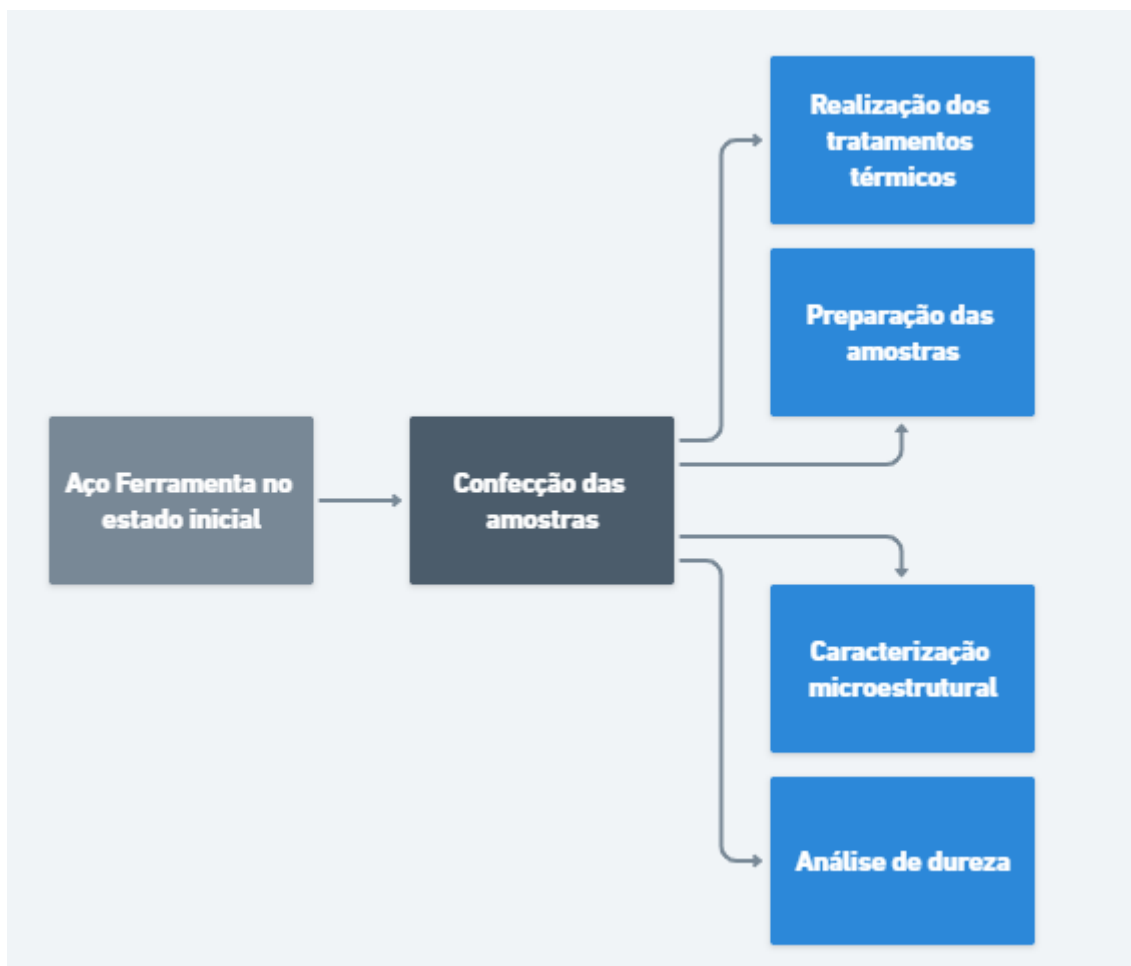


Fonte: Adaptado Metals Handbook, 2002.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo deste trabalho consistiu na deposição do aço AISI H13 por meio de LP-DED, avaliando-se a influência dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento nas características tribológicas, comparado com o aço AISI H13 obtido por meio do processo de fundição convencional. Para atingir o objetivo, a pesquisa foi realizada em cinco partes: 1. Deposição das amostras; 2. Tratamento térmico de têmpera e revenimento; 3. Análise microestrutural (microscopia confocal a laser); 4. Ensaio de dureza (Rockwell C); 5. Ensaio de desgaste microadesivo. Na Figura 6 apresenta-se um fluxograma de como o trabalho foi realizado em etapas.

Figura 6: Fluxograma das etapas do trabalho.



Fonte: Próprio autora.

3.1. Deposição da amostra

As amostras foram depositadas em uma máquina de manufatura híbrida produzida pela Indústrias Romi S.A., modelo D800 Hybrid, instalada no Laboratório de Processos Avançados e de

Sustentabilidade – LAPRAS, pertencente ao Núcleo de Manufatura Avançada – NUMA, SEP/EESC/USP. A máquina possui uma fresadora CNC de cinco eixos e um cabeçote de deposição para LP-DED, equipado com laser Nd:YAG de até 1500 W de potência, cujo *spot* é de 2 mm de diâmetro. Apresenta-se na Figura 7 a máquina híbrida utilizada para deposições de AISI H13.

Figura 7: Máquina de manufatura híbrida (LP-DED e usinagem) produzida pela Indústrias Romi S.A., modelo D800 Hybrid.



Fonte: Própria autora.

O pó de AISI H13 utilizado foi produzido pela LPW Technology Ltda., com diâmetros variando entre 45 e 106 μm . As amostras foram depositadas em um substrato de AISI H13 nas dimensões de 100x50x25,4mm, obtido por meio de processos convencionais de fundição e forjamento.

A composição química do substrato é apresentada na Tabela 4 com valores aproximados de cromo, molibdênio, silício, vanádio e carbono, porém a amostra apresentou nível de níquel e ferro ao comparar a Tabela 2 como valor de referência do catálogo da Villares Metals.

Tabela 4: Composição química do substrato AISI H13.

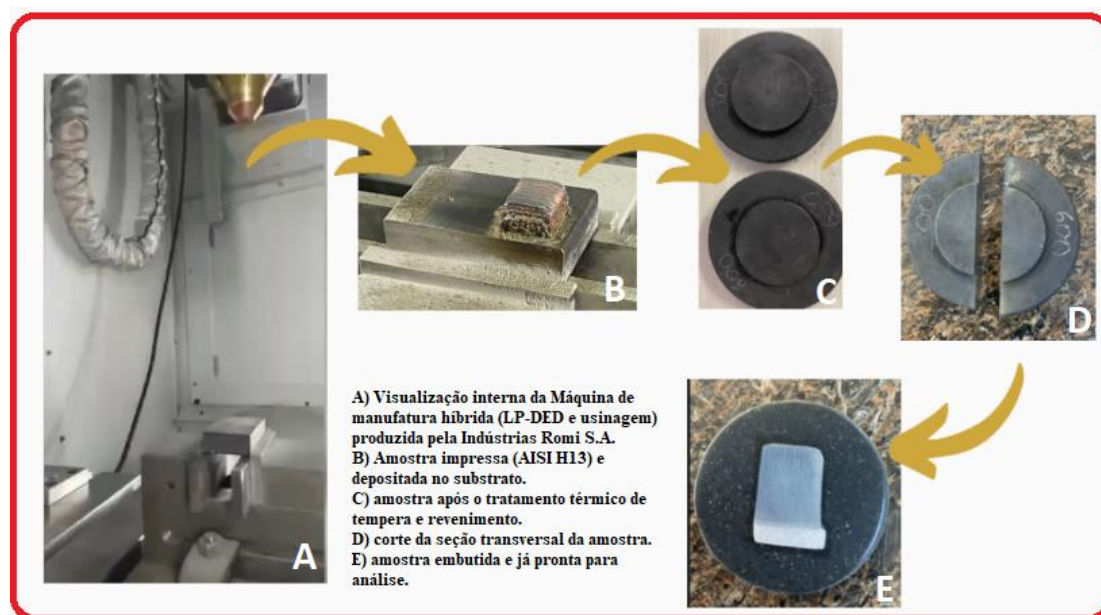
Elementos químicos	Cr	Mo	Si	V	C	Ni	Fe
Proporção em peso	5,18	1,36	1,04	0,83	0,36	0,21	Balanço

Fonte: Própria autora.

As amostras foram depositadas utilizando-se 800 W de potência do laser, com 600 mm/min de velocidade de avanço e taxa de alimentação do pó de 9,5 g/min. As deposições foram realizadas em atmosfera ambiente com proteção local de argônio fornecida por um bocal coaxial a uma taxa de 8 l/min (*shielding gas*). O gás argônio também foi usado para proteção do laser (*nozzle gas*) e para o transporte do pó (*carrier gas*), com vazões de 4 l/min e 3 l/min, respectivamente. Com essas condições, foram obtidos cordões com 1,0 mm de largura e 0,5 mm de altura. Portanto, foi utilizado 0,5 mm como incremento constante no eixo Z e 0,8 mm de *overlapping*. A trajetória de deposição utilizada foi em X e Y, sendo rotacionado em 90° a cada camada depositada. Esses parâmetros de processo foram selecionados com base em experimentos anteriores. Foram depositados quatro cubos com dimensões de 20x20x15 mm.

Após a confecção das amostras, foram realizados os tratamentos térmicos e sua respectiva preparação para que os ensaios e as análises pudessem ser feitas, como pode ser visto no esquema abaixo de como foi o processo (FIGURA 8).

Figura 8 - Confecção das amostras estudadas.



Fonte: Própria Autora

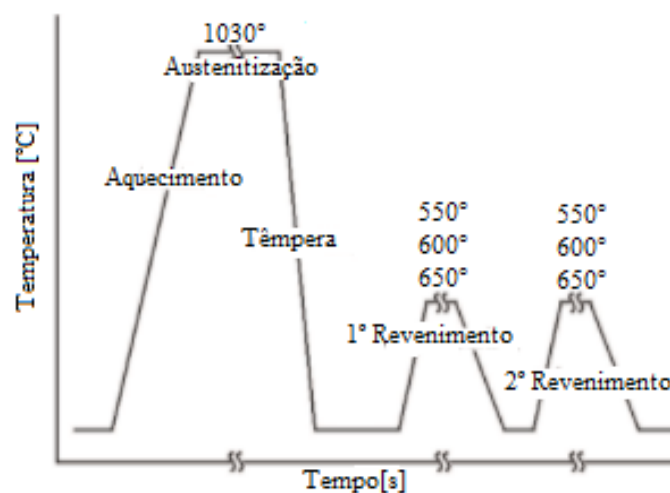
3.2. Tratamento térmico de têmpera e revenimento

Após as deposições LP-DED, uma amostra foi separada e utilizada como referência. As outras três foram depositadas, juntamente com três amostras do aço AISI H13 obtido por meio de processos convencionais de fundição e forjamento, foram submetidas a tratamentos térmicos de têmpera e

revenimento. Essa etapa foi realizada no Laboratório de Tratamentos Térmicos, pertencente ao Departamento de Engenharia de Materiais – SMM, EESC/USP. Co

O tratamento de têmpera foi realizado aquecendo as amostras a temperatura de austenitização de 1030 °C, durante 2 horas em um forno convencional, com subsequente resfriamento em óleo. Os tratamentos de revenimento foram realizados nas temperaturas de 550, 600 e 650 °C, com 2 horas de tempo de permanência no forno. O revenimento foi realizado duas vezes na mesma temperatura e, entre cada revenimento, as peças foram resfriadas lentamente até a temperatura ambiente. Esse procedimento é realizado para desestabilizar a austenita retida para transformação da martensita (primeiro revenimento) e revenir essa martensita obtida (segundo revenimento). Na Figura 9 é apresentado um desenho esquemático da temperatura em função do tempo para os tratamentos de têmpera e revenimento.

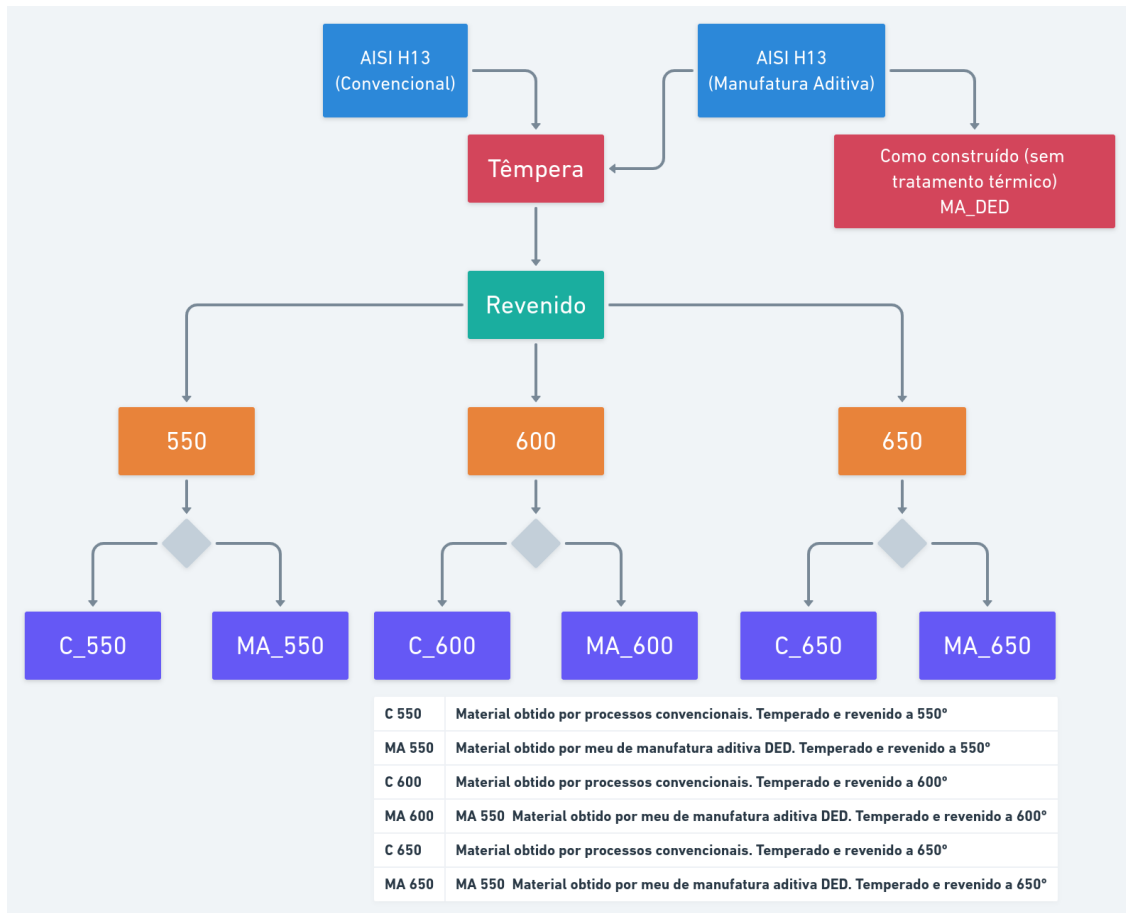
Figura 9: Desenho esquemático dos tratamentos térmicos realizados.



Fonte: Própria autora.

Apresenta-se na Figura 10 um fluxograma das disposições das amostras utilizadas nesse trabalho, juntamente com o nome adotado para as amostras.

Figura 10: Fluxograma das disposições das amostras utilizadas no presente trabalho.



Fonte: Própria autora.

3.3 Análise microestrutural

Para realizar as análises metalográficas das secções transversais das amostras, foram necessários identificar e embutir as amostras de maneira a observar a região do corte transversal. Para tal, foram utilizadas as dependências do Laboratório de Análises Metalográficas do Departamento de Engenharia de Materiais (SMM/EESC/USP). As amostras foram seccionadas em cortadeira metalográfica com disco abrasivo de SiC, embutidas a quente em baquelite, lixadas com lixas d'água de 80, 140, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh e polidas em solução aquosa de alumina de 1,0 µm. O reagente químico Nital 2% foi utilizado para revelar a microestrutura. As análises microestruturais foram realizadas por meio de aquisição de imagens em microscópio confocal a laser, produzido pela Olympus Corporation, modelo OLS4000 com câmera integrada, instalado no Laboratório de Metalografia do Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade – LAPRAS (NUMA/SEP/EESC/USP).

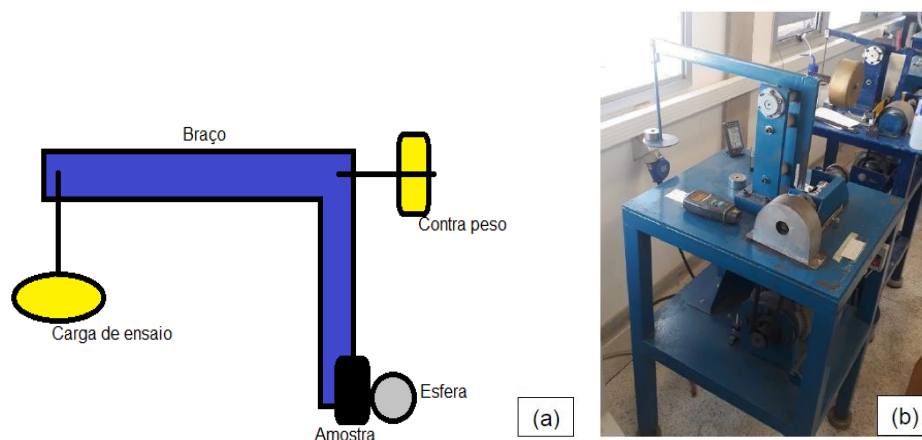
3.4 Ensaio de dureza

O ensaio de dureza Rockwell C foi realizado nas amostras depositadas por meio de LP-DED e por meio de processo convencional. O equipamento utilizado localiza-se no Núcleo de Ensaios de Materiais e Análise de Falha – NEMAF (SMM/EESC/USP) e foi fabricado pela LECO Ltda., modelo RT-240. Foi utilizado penetrador cônico de diamante com ângulo de 120° , pré-carga de 10 kgf e carga de ensaio de 150 kgf, conforme requerido pelas normas ASTM E18 (*Standard methods for Rockwell hardness and Rockwell superficial hardness of metallic materials*) e a ISO 6508-1 (*Metallic materials – Rockwell hardness test – Part 1: Test method scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T*). Para melhor precisão dos resultados, foram realizadas 15 medidas para a obtenção de média e desvio padrão.

3.5 Ensaio de desgaste microadesivo

Para avaliar a resistência ao desgaste das amostras, foram realizados ensaios de desgaste microadesivo. O equipamento utilizado foi construído e está instalado no Laboratório de Engenharia de Superfícies (SMM/EESC/USP). Esse ensaio também é conhecido como “*Calotest*”, cujo termo é devido a junção de calota e teste de ensaio. Apresenta-se na Figura 11 o desenho esquemático do equipamento utilizado no ensaio de desgaste microadesivo, juntamente com uma fotografia de onde o equipamento está instalado.

Figura 11: (a) Esquema do funcionamento de um ensaio de microadesivo. (b) Máquina de ensaio de desgaste microadesivo (Laboratório de Engenharia de Superfícies SMM-EESC)



Fonte: Própria autora.

Para cada ensaio, utilizou-se uma esfera de aço AISI 52100, temperada e revenida, com dureza de 61 HRC. As condições de ensaio foram: rotação da esfera de 300 rpm, tempos de ensaio de 5, 10, 20 e 40 minutos e carga de ensaio de 150 g. Os produtos desses ensaios foram regiões desgastadas em forma de calota cujo diâmetro médio foi usado para obter volumes desgastados conforme a Equação 1, onde: V: volume removido; d: diâmetro médio da calota produzida e R: raio da esfera, 12,7 mm. Desse modo foi possível plotar em gráfico a distância percorrida em função do volume removido.

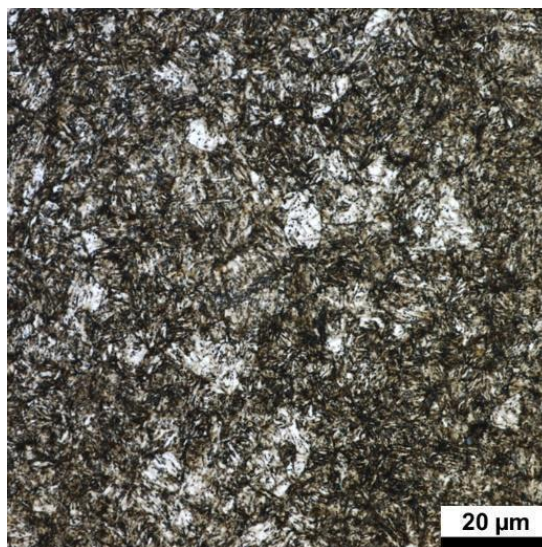
$$V = \frac{\pi \cdot d^4}{64 \cdot R} ; \text{ para } d \ll R$$

Equação 1

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

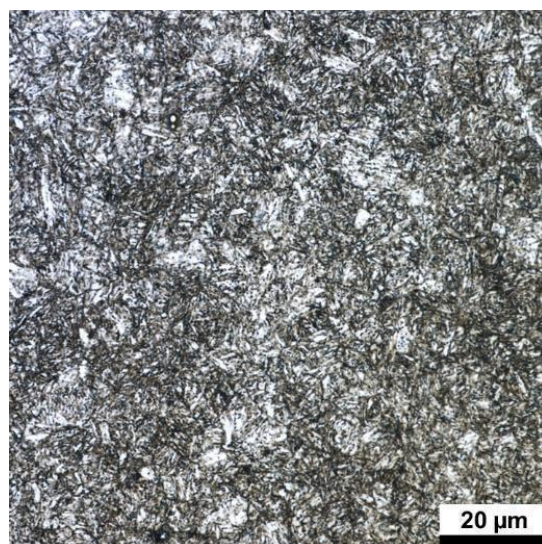
Foram apresentadas nas Figuras 12 a 14 as micrografias ópticas do AISI H13 temperado e revenido a 550, 600 e 650 °C. Verificou-se que ocorreu refino dos grãos com o aumento da temperatura de revenimento, como pode ser visto nas imagens a seguir:

Figura 12: Micrografia óptica do AISI H13, obtido por meio de processos convencionais, temperado e revenido a 550 °C.



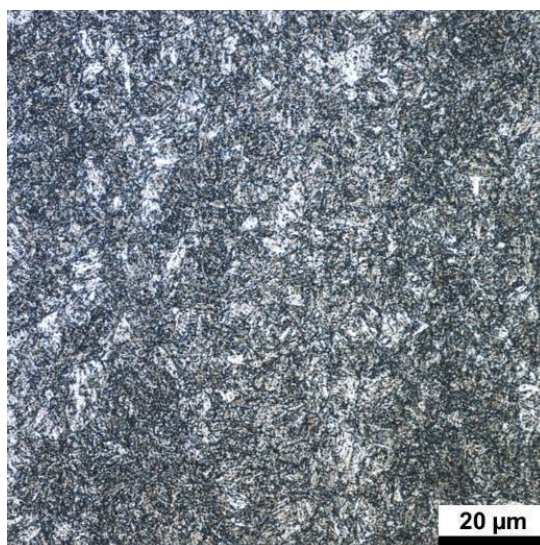
Fonte: Própria autora.

Figura 13: Micrografia óptica do AISI H13, obtido por meio de processos convencionais, temperado e revenido a 600 °C.



Fonte: Própria autora.

Figura 14: Micrografia óptica do AISI H13, obtido por meio de processos convencionais, temperado e revenido a 650 °C.



Fonte: Própria autora.

A martensita obtida pela têmpera apresentou elevada dureza e resistência mecânica, porém suas tensões nesta transformação podem gerar trincas e distorções no aço temperado, por isso, ao revení-lo, alivia-se as tensões, melhorando a tenacidade e ductilidade do material, além de observar uma maior homogeneidade da austenita ao aumentar a temperatura de têmpera e revenimento pelo processo convencional (LUCCHINI, 2005).

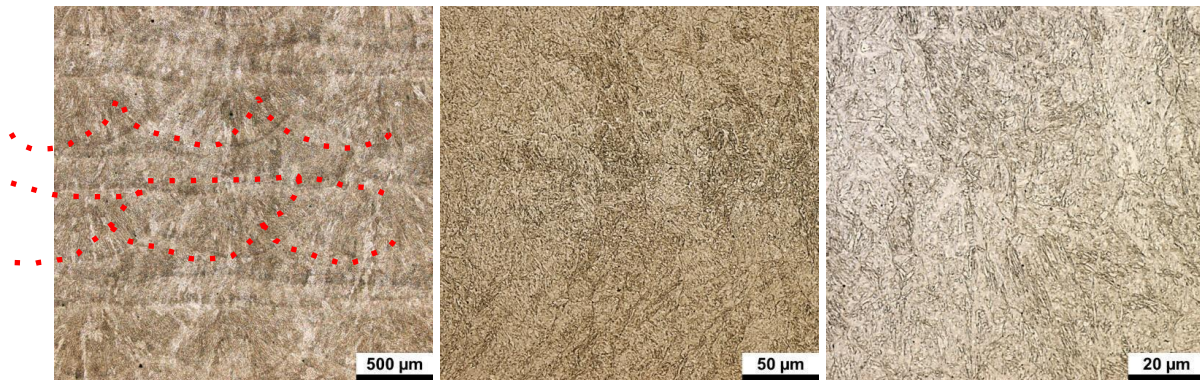
Como consequência da têmpera, ao aumentar o teor de carbono, pode ocasionar a formação da austenita retida. Desta maneira, ao revenir o aço pode ocorrer a precipitação dos carbonetos na austenita retida, reduzindo assim, o teor de carbono. Ao resfriá-lo, esta austenita retida se transforma em martensita, necessitando assim, um outro revenimento, principalmente pelo fato de ser para aços ferramentas e aços de alto teor de carbono. Entretanto, a detecção desta austenita retida, somente pode ser visualizada por meio de difração de raios-X ou por ataques metalográficos (FERNANDES, 2019), que neste trabalho não foram realizados.

Apresentou-se na Figura 15 as micrografias ópticas da amostra depositada por meio do processo LP-DED. Verificou-se que foram obtidas microestruturas típicas de solidificação rápida, juntamente com as linhas de construção dos cordões depositados (indicadas com linhas vermelhas tracejadas).

Em seguida, pôde ser visto nas Figuras 15 a 18 as micrografias ópticas obtidas pelas amostras com três aumentos diferentes: 500μm, 50μm e 25μm, com o propósito de apresentar a evolução microestrutural ao variar a temperatura do revenimento. Ao analisar a Figura 15 especificamente, observou-se a existência de contornos de linhas depositadas pela manufatura aditiva, mostrando as direções de como foram impressas as amostras nos eixos X, Y e Z, estas linhas foram desenhadas

com pontilhados em vermelho para melhor visualização na imagem, o que comprova que esta microestrutura é típica de solidificação rápida, uma vez que esta amostra não foi realizado nenhum tipo de tratamento térmico ao contrário das outras amostras que sofreram tratamento térmico e consequentemente, as linhas depositadas não foram visualizadas como pode-se observar nas Figuras 16, 17 e 18.

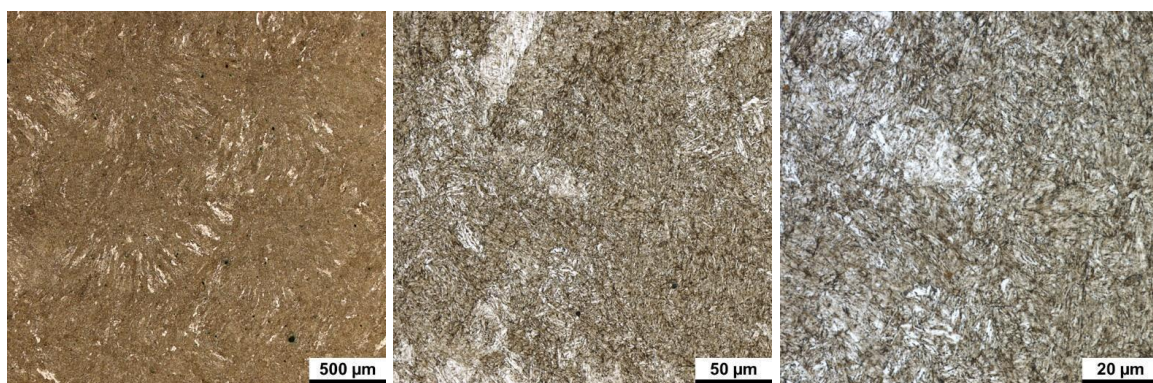
Figura 15: Micrografia óptica do AISI H13, obtido por meio de LP-DED como construído. As linhas de construção dos cordões são indicadas por linhas vermelhas tracejadas.



Fonte: Própria autora.

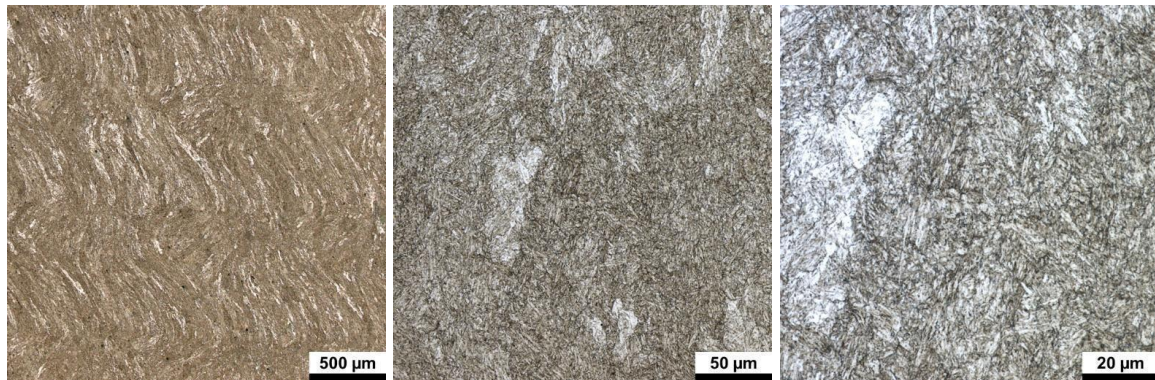
Em relação às amostras que foram submetidas a tratamentos de têmpera e de revenimento obtidas por meio do processo LP-DED do AISI H13 não apresentou cordões de deposição como na amostra anterior, como pode ser visto as micrografias ópticas apresentadas nas Figuras 16 a 18 ao ampliar a imagem para 500μm, isto ocorreu devido ao tratamento térmico sofrido por estas amostras.

Figura 16: Micrografia óptica do AISI H13, obtido por meio de LP-DED, temperado e revenido a 550 °C.



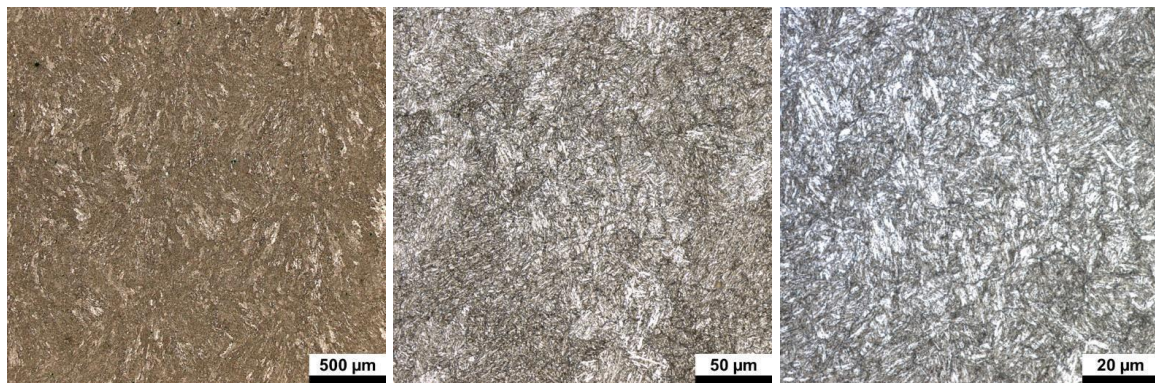
Fonte: Própria autora.

Figura 17: Micrografia óptica do AISI H13, obtido por meio de LP-DED, temperado e revenido a 600 °C.



Fonte: Própria autora.

Figura 18: Micrografia óptica do AISI H13, obtido por meio de MA DED, temperado e revenido a 650 °C.



Fonte: Própria autora.

As amostras que sofrem tratamento térmico, verificou-se que ocorreu a transformação de fases semelhante ao processo convencional ao comparar as temperaturas de revenimento (550 a 650 °C). Além disso, as linhas de construção dos cordões depositados não estão definidas como na amostra como construída, evidenciando que ocorreu ótima ligação metalúrgica, por meio de fusão e solidificação do material adicionado, entre os cordões e camadas depositados. Segundo trabalho de Gabardo 2008, amostras revenidas a 500 °C ou abaixo, devem ser descartadas devido aos baixos valores de energia absorvida. Este autor observou que há uma influência direta entre a temperatura de austenitização, ou seja, quanto maior a temperatura, maior será o valor da dureza após a têmpera, devido a solubilização dos carbonetos secundários. Percebeu-se que desta maneira o processo convencional e o LP-DED apresentaram microestruturas semelhantes ao temperar e revenir-los.

Na Tabela 5 são apresentados os valores de dureza Rockwell C (média e desvios padrão) obtidos para as amostras estudadas.

Tabela 5: Resultados obtidos para o ensaio de dureza Rockwell C.

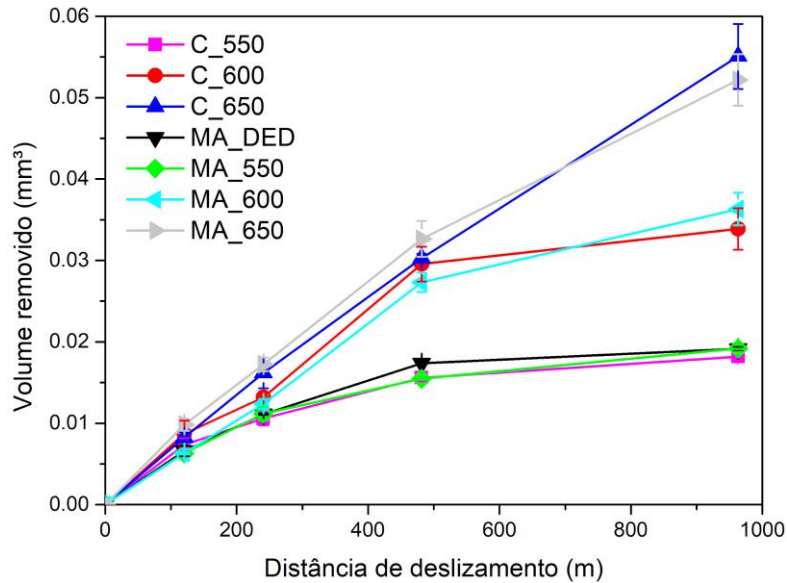
Condição	Convencional	LP-DED
Como construído	-	51.9 ± 2.1
Temperado e Revenido 550 °C	50.6 ± 0.5	49.9 ± 0.6
Temperado e Revenido 600 °C	41.9 ± 1.2	42.4 ± 1.1
Temperado e Revenido 650 °C	29.8 ± 0.5	28.3 ± 1.1

Fonte: Própria autora.

Observou-se que a amostra obtida por meio do processo LP-DED (como construído), apresentou valores de dureza semelhantes às amostras temperadas e revenidas a 550°C. Para as amostras revenidas, verificou-se que foram obtidos valores de durezas semelhantes entre as amostras produzidas por meio dos processos convencional e LP-DED, além disso, a dureza apresentou dependência em relação à temperatura de revenimento. Logo, as temperaturas de revenimento mais altas favorecem a precipitação de carbonetos mais grossos na martensita, o que reduz a sua dureza, apesar de que o grau do revenido também afetou o valor de dureza da amostra, desta forma, o valor da dureza diminuiu com o aumento do revenimento, isso ocorreu pois ao realizar recozimento sucessivamente, os carbonetos precipitados da martensita tendem a fundir. Em aplicações industriais de aços AISI H13, é recomendado procurar uma combinação que proporciona uma alta tenacidade e dureza. Essas propriedades são geralmente contrárias, pois a alta dureza tende a reduzir a tenacidade do material (GABARDO, 2008).

Na Figura 19 são apresentados os dados obtidos no ensaio de desgaste microadesivo para o AISI H13 por meio de processos convencionais em três temperaturas de têmpera e revenimento bem como na LP-DED, nas condições de como depositado e em três diferentes temperaturas ao temperar e revení-lo.

Figura 19: Gráficos de desgaste microadesivo.



Fonte: Própria autora.

Estes resultados mostraram visivelmente o comportamento destes dois processos na mesma temperatura de revenimento, ou seja, os valores da C_550 e MA_550 foram equivalentes, bem como C_600 com MA_600 e C_650 com MA_650. Já a amostra MA_DED como construído apresentou valores semelhantes aos dois processos na temperatura de 550 °C. Observou-se ainda que a dureza está diretamente relacionada à resistência ao desgaste, sendo que, as amostras de maior dureza desgastaram menos quando comparadas com as amostras de dureza inferiores. Normalmente, as resistências ao desgaste dos materiais estão associadas às suas durezas, sendo que essas propriedades são inversamente proporcionais, conforme proposto por Archard (1953) e demonstrado na Equação 2. Este mesmo autor apresentou uma equação que indica a correlação empírica entre o volume removido no desgaste e a dureza do material.

$$V = k[(L.D)/H] \quad \text{Equação 2}$$

Onde, V: volume removido; k: é o coeficiente de desgaste; L: é a carga aplicada; D: é a distância de deslizamento e; H: é a dureza do material.

CONCLUSÕES

Foram depositadas amostras de AISI H13 por meio de manufatura aditiva, utilizando o processo LP-DED, com microestruturas típicas de solidificação rápida, juntamente com linhas de construção dos cordões depositados.

Após os tratamentos de têmpera e revenimento, as amostras de AISI H13 produzidas por meio de processos convencionais de fundição e forjamento apresentaram microestruturas, durezas e resistências ao desgaste semelhantes as amostras produzidas por meio do processo LP-DED, quando submetidas as mesmas condições de tratamentos térmicos.

Embora o trabalho não tenha realizado um estudo mais aprofundado na cristalografia com microscopia eletrônica, com os ensaios de desgaste e dureza, juntamente com a microscopia óptica, pôde-se observar características semelhantes entre o processo convencional com a manufatura aditiva depositada por LP-DED.

Embora os resultados mostrem que o processo convencional e a manufatura aditiva pelo método DED possuem similaridades ao realizar análises tribológicas das amostras de AISI H13 em diferentes temperaturas de revenimento, algumas análises precisam ser feitas como a difração de raios-X para entender melhor a microestrutura do material ao ser impresso.

Portanto, pode-se concluir que o processo de aços ferramentas com o AISI H13 pelo LP-DED obteve sucesso nos resultados em relação às propriedades mecânicas ao comparar processos convencionais na obtenção de peças com este material. E para pesquisas futuras, seria interessante analisar a viabilidade econômica industrial em imprimir peças de AISI H13 pelo processo LP-DED.

REFERÊNCIAS

AHRENS, C. H.; VOLPATO, N. 1965-. **Prototipagem rápida : tecnologias e aplicações**. [S.l.]: **Edgard Blücher**, 2007. Disponível em: . Acesso em: 27 out. 2021.

ARCHARD, J. F. **Contact and rubbing of flat surfaces**. **Journal of Applied Physics**, v. 24, n. 8, p. 981–988, 1953.

ASM, METALS HANDBOOK, **Metallography and Microstructures**, vol. 9, 2002.

ASTM International, –ASTM F2792 – 12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, | doi: 10.1520/F2792–12A.

ATTARAN, M. The Rise of 3D Printing: The Advantages of Additive Manufacturing Over Traditional Manufacturing. **Business Horizons**, v. 60, pp. 677-688, 2017

CAMPBELL, I.; BOURELL, D.; GIBSON, I. Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age. **Rapid Prototyping Journal**, v. 18, n.4, p. 255 – 258, 2012. <http://dx.doi.org/10.1108/13552541211231563>

DEBROY, T. *et al.* **Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties**, Prog. Mater. Sci., vol. 92, pp. 112–224, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.

FERNANDES, A. F. **Influência do tratamento térmico do aço ferramenta AISI H13 no acabamento superficial após usinagem**. Monografia do Curso Engenharia de Materiais. Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

FIGUEIREDO, G. V. **Caracterização de WC-17Co e WC-7Ni-19Cr depositados por meio de Manufatura Aditiva (MA) utilizando o método Direct Energy Deposition (DED)**. Monografia do Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2020.

GABARDO, J. F. **Estudo da tenacidade do aço ferramenta h13**. Curitiba, 2008. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná.

GARRETT, B. 3D printing: New economic paradigms and strategic shifts. **Global Policy**, v. 5, n. 1, p. 70–75, 2014

GIBSON, I. *et al.* **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. 2009. v. 54. Disponível em: . Acesso em: 27 out. 2021

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition. **Springer New York**, 2015.

GRESS, D. R.; KALAFSKY, R. V. Geographies of production in 3D: Theoretical and research implications stemming from additive manufacturing. **Geoforum**, v. 60, p. 43–52, 2015.

GOMES, J.; WILTGEN, F. Avanços na Manufatura Aditiva em Metais: Técnicas, Materiais e Máquinas. **Revista Tecnologia**, v.41(01), pp.1-16, 2020.

GUO, N.; LEU, M. C. Additive manufacturing: Technology, applications and research needs. **Frontiers of Mechanical Engineering**, v. 8, n. 3, p. 215–243, 2013

HÖLMSTROM, J.; PARTANEN, J.; TUOMI, J.; WALTER, M. Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: alternative approaches to capacity deployment. **Journal of Manufacturing Technology Management**. v. 21, n. 6, p. 687-697. 2010.
<http://dx.doi.org/10.1108/17410381011063996>

ISAZA, J. F. et al.; Additive Manufacturing with metal powders: Design for Manufacture evolves into Design for Function. **Powder Metallurgy Review Magazine**, v. 3,n. 2, 2018.

JUJIE, Y. *et al.* A Comprehensive Study of Steel Powders (316L, H13, P20 and 18Ni300) for Their Selective Laser Melting. **Additive Manufacturing Metals**, v. 9, n. 86, 2019.

LIPSON, H.; KURMAN, M. Fabricated: **The New World of 3D Printing**. Indianápolis: John Wiley and Sons, Inc., 2013.

LONGHITANO, G. A. **Estudo de tratamentos térmicos e acabamentos de superfície na liga Ti-6Al-4V produzida via DMLS para aplicação em implantes**. Dissertação de mestrado (área de materiais e processos de fabricação). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. p. 85, 2016.

LU, Y. J. *et al.* CoCrWCu alloy with antibacterial activity fabricated by selective laser melting: Densification, mechanical properties and microstructural analysis. **Powder Technology**. 2018, 325, 289–300.

MARTUKANITZ, R.P. Directed-Energy Deposition Processes. University of Virginia and Commonwealth Center for Advanced Manufacturing. **ASM Handbook**, v. 24, Additive Manufacturing Processes, 2020.

MAZUR, M. *et al.* Numerical and experimental evaluation of a conformally cooled H13 steel injection mould manufactured with selective laser melting. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 2017, 93, 881–900.

MURR, L. E. *et al.* Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting. **Technologies Journal of Materials Science Technology**, v.28, n. 1-14, 2012.

NGO, T. D. *et al.* Additive manufacturing (3D printing): A review of materials , methods , applications and challenges,|| **Compos**. Part B, vol. 143, no. February, pp. 172–196, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.

NANDWANA, P KANNANA, R, SIDDEL, D. Microstructure evolution during binder jet additive manufacturing of H13 tool steel. **Additive Manufacturing**, v.36, pp. 101534, 2020.

ONAL, E. *et al.* Mechanical properties and in vitro behavior of additively manufactured and functionally graded Ti6Al4V porous scaffolds. **Metals**, v. 8, n. 200, 2018.

PINHEIRO, C. M. P.; MOTA, G. E; STEINHAUS, C.; SOUZA, M. **Impressoras 3D: uma mudança na dinâmica do consumo**. Signos do Consumo, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 15-22, jan./jun. 2018.

SABOORI, A. *et al.* Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair. **Applied Sciences**, v. 9, n. 16, p. 3316, 2019.

SOARES JUNIOR, E. **Efeito do tratamento térmico na microestrutura e nas propriedades mecânicas de Aços-ferramentas para trabalho a frio**. 2006. 100f. Dissertação de mestrado (Tecnologia nuclear - materiais) São Paulo: Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, 2006.

VALES, S. **Estudo da influência do tratamento criogênico no aço AISI H13**. 2010. 107f. Dissertação do mestrado (Engenharia de materiais). São Paulo: Universidade de São Paulo, 2010.

YAKOUT, M, et al. **A review of metal additive manufacturing technologies. Solid State Phenomena**, [S. l.], p. 1–14, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.278.1>. Acesso em: 27 out. 2021.

3D LAB SOLUÇÕES EM IMPRESSÃO 3D. **Conheça as propriedades técnicas dos materiais para impressora 3D**. Disponível em: https://3dlab.com.br/propriedades-dos-materiais-para-impressora-3d/#Tabela_de_propriedades_dos_materiais_para_impressora_3D. <Acesso em: 5 set. 2021.>