

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

GABRIEL VIANA FIGUEIREDO

**Caracterização de WC-17Co e WC-7Ni-19Cr depositados por meio de
Manufatura Aditiva (MA) utilizando o método Direct Energy Deposition
(DED)**

São Carlos

2020

GABRIEL VIANA FIGUEIREDO

**Caracterização de WC-17Co e WC-7Ni-19Cr depositados por meio de
Manufatura Aditiva (MA) utilizando o método Direct Energy Deposition
(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. Reginaldo Teixeira Coelho

VERSÃO ORIGINAL

São Carlos
2020

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).

V118 Viana Figueiredo, Gabriel
Caracterização de WC-17Co e WC-7Ni-19Cr depositados por meio de Manufatura Aditiva (MA) utilizando o método Direct Energy Deposition (DED) / Gabriel Viana Figueiredo; orientador Reginaldo Teixeira Coelho. São Carlos, 2020.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2020.

1. Manufatura Aditiva. 2. Direct Energy Deposition (DED). 3. Impressão 3D de metais. I. Título.

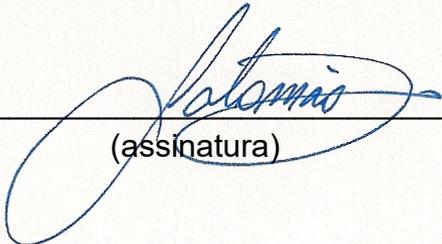
Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Gabriel Viana Figueiredo
Título do TCC: Caracterização de WC-17Co e WC-7Ni-19Cr depositados por meio de Manufatura Aditiva (MA) utilizando o método Direct Energy Deposition (DED)
Data de defesa: 26/11/2020

Comissão Julgadora	Resultado
Professor Doutor Reginaldo Teixeira Coelho (orientador)	APROVADO
Instituição: EESC - SEP	
Professor Doutor Luiz Carlos Casteletti	APROVADO
Instituição: EESC - SMM	
Professor Doutor Fábio Edson Mariani	APROVADO
Instituição: EESC - SEP	

Presidente da Banca: **Professor Associado Rafael Salomão**



(assinatura)

DEDICATÓRIA

*A minha família, amigos,
professores e todos os que
contribuíram nessa caminhada
universitária.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, professores, técnicos e colaboradores, pelo ambiente de convívio, ensinamentos e oportunidades durante meu período na instituição.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais, pelo apoio incessável e infraestrutura de excelência oferecida durante o curso.

Ao Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho, ao pós-doutor Fábio Edson Mariani e demais integrantes do LAPRAS (Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade) que me apoiaram e contribuíram no desenvolvimento desse projeto.

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio financeiro ao Projeto Temático 2016/11309-0 e atribuição da bolsa de iniciação científica 2020/03110-5.

Ao Instituto Superior Técnico e ao Prof. Dr. Marco Leite, que também contribuiu para definir e executar este trabalho, válido como tese do programa de Mestrado Integrado em Engenharia de Materiais.

Aos meus pais, Lázaro e Andréia, e ao meu irmão e companheiro de curso, Danilo, que sempre estão presente em meu dia-a-dia e me motivaram e apoiaram na minha carreira.

Aos meus amigos espalhados pelo mundo inteiro, por todas as aventuras juntas e as experiências que ficarão marcadas para sempre de um período inesquecível.

Por fim, agradeço a Deus, pelo dom da vida, pelas bênçãos e por tudo que me foi dado nessa caminhada.

EPÍGRAFE

“Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível, e de repente você estará fazendo o impossível.”

São Francisco de Assis

RESUMO

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).

2020. 54 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

Atualmente a manufatura de peças e de suas ferramentas para produção em série e exclusiva, como moldes e matrizes, enfrenta um novo desafio: máxima precisão, flexibilidade e alta velocidade de produção. De modo a solucionar essas limitações de processos, este estudo tem como objetivo caracterizar camadas de WC-17Co e WC-7Ni-19Cr produzidas em aços AISI H13 e AISI 4140 por meio de manufatura aditiva (MA), utilizando o método *Direct Energy Deposition (DED) powder-fed system* a laser. O processo de MA-DED *Powder-fed system* a laser é uma tecnologia recente e, para o desenvolvimento de revestimentos em peças, é necessário um estudo completo dos parâmetros de deposição para a utilização de outros materiais como matéria-prima. Neste contexto, as deposições produzidas foram avaliadas a fim de verificar os parâmetros de manufatura. As amostras foram caracterizadas utilizando-se de microscopia confocal a laser, microdureza Vickers e ensaios de desgaste microadesivo, do tipo esfera presa. Foram obtidos revestimentos homogêneos de elevadas durezas e resistentes ao desgaste, quando comparados aos substratos.

Palavras-chave: 1. *Manufatura aditiva* 2. *Direct Energy Deposition (DED)* 3. *Impressão 3D de metais*

ABSTRACT

FIGUEIREDO, G. V. **Characterization of WC-17Co e WC-7Ni-19Cr deposited through Additive Manufacturing (AM) using the Direct Energy Deposition (DED) method.** 2020. 54 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

Currently, the manufacturing of parts and their tools for series production and exclusive, such as molds and dies, faces a new challenge: maximum precision, flexibility and high production speed. In order to solve these process limitations, this study aims to characterize layers of WC-17Co and WC-7Ni-19Cr produced in AISI H13 and AISI 4140 steel by means of additive manufacturing (AM) using the Direct Energy Deposition method (DED) powder-fed laser system. The laser MA-DED Powder-fed system process is a recent technology and, for the development of coatings on parts, a complete study of the deposition parameters is required for the use of other materials as raw material. In this context, the depositions produced were evaluated in order to verify the manufacturing parameters. The samples were characterized using laser confocal microscopy, Vickers microhardness and microadhesive wear tests (stuck sphere type). Homogeneous coatings of high hardness and wear resistance were obtained when compared to substrates.

Keywords: 1. *Additive manufacturing* 2. *Direct Energy Deposition (DED)* 3. *3D printing*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sequência de etapas para a fabricação de uma peça por Manufatura Aditiva.....	33
Figura 2 – Resumo das categorias de Manufatura Aditiva e suas tecnologias.....	34
Figura 3 – Os 5 principais benefícios da MA comparados com os processos convencionais.....	36
Figura 4 – Relação entre volume e custo de produção por unidade (manufatura aditiva X técnicas de manufatura convencionais)	38
Figura 5 – Relação entre complexibilidade e custo (manufatura aditiva X técnicas de manufatura convencionais)	38
Figura 6 – Desenho esquemático do funcionamento do processo DED.....	41
Figura 7 – Equipamento fabricado pela BeAM modelo Modulo 250 utilizado nas deposições.....	42
Figura 8 – (a) Esquema do funcionamento de um ensaio de microadesivo. (b) Máquina de ensaio de desgaste microadesivo (Laboratório de Engenharia de Superfícies SMM-EESC).....	45
Figura 9 – Detalhes das seções transversais de WC-17Co depositados em H13 utilizando diferentes configurações de velocidade de deposição e de potência.....	46
Figura 10 – Detalhes das seções transversais de WC-17Co depositados em 4140 utilizando diferentes configurações de velocidade de deposição e de potência.....	47
Figura 11 – Detalhes das seções transversais de WC-7Ni-19Cr depositados em H13 utilizando diferentes configurações de velocidade de deposição e de potência.....	47
Figura 12 – Detalhes das seções transversais de WC-7Ni-19Cr depositados em 4140 utilizando diferentes configurações de velocidade de deposição e de potência.....	48
Figura 13 – Detalhe da camada de WC-17Co depositada em H13.....	49
Figura 14 – Detalhe da camada de WC-17Co depositada em 4140.....	50
Figura 15 – Detalhe da camada de WC-7Ni-19Cr depositada em H13.....	50
Figura 16 – Detalhe da camada de WC-7Ni-19Cr depositada em 4140.....	51
Figura 17 – Detalhe do substrato AISI 4140.....	51
Figura 18 – Detalhe do substrato AISI H13.....	52
Figura 19 – Detalhe da camada e da ZTA para WC-17Co depositado em H13.....	52
Figura 20 – Detalhe da camada e da ZTA para WC-17Co depositado em 4140.....	53
Figura 21 – Detalhe da camada e da ZTA para WC-7Ni-19Cr depositado em H13.....	53
Figura 22 – Detalhe da camada e da ZTA para WC-7Ni-19Cr depositado em 4140.....	54
Figura 23 – Perfil de microdureza para a camada WC-7Ni-19Cr depositada em H13.....	55
Figura 24 – Perfil de microdureza para a camada WC-7Ni-19Cr depositada em 4140.....	55
Figura 25 – Perfil de microdureza para a camada WC-17Co depositado em H13.....	56

Figura 26 – Perfil de microdureza para a camada WC-17Co depositado em 4140.....	56
Figura 27 – Resultado comparativo dos ensaios de desgastes microadesivo para deposições utilizando AISI 4140 como substrato.....	57
Figura 28 – Resultado comparativo dos ensaios de desgastes microadesivo para deposições utilizando AISI H13 como substrato.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições de tratamentos de têmpera e revenimento utilizados para os aços AISI H13 e AISI 4140.....	43
Tabela 2 – Medidas médias dos ensaios de microdureza.....	54

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

LISTA DE SÍMBOLOS

WC	Carboneto de Tungstênio
Co	Cobalto
Cr	Cromo
g	Gramas
gf	Gramas força
°C	Graus Celsius
l	Litros
m	Metros
mm	Milímetros
μm	Micrômetros
mm ³	Milímetros
N	Newtons
Ni	Níquel
V	Volume
rpm	Rotações por minuto
W	Watts

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	31
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	33
2.1	Manufatura Aditiva (MA)	33
2.2	História da Manufatura Aditiva.....	35
2.3	Vantagens da Manufatura Aditiva	36
2.4	Quando adotar a Manufatura Aditiva?	37
2.5	Manufatura Aditiva em metais	39
2.6	<i>Direct Energy Deposition</i> (DED).....	40
2.7	<i>Laser Cladding</i>	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	Deposição dos revestimentos	42
3.1.1	Taxa de alimentação do pó	43
3.1.2	<i>Overlapping</i>	44
3.2	Análise microestrutural.....	44
3.3	Ensaio de microdureza Vickers.....	44
3.4	Ensaio de desgaste	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5	CONCLUSÕES.....	58
6	ESTUDOS FUTUROS	58
7	REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

O termo Manufatura Aditiva (MA) teve origem nos anos 80 para se referir a processos em que a peça é fabricada camada por camada. Inicialmente limitada a materiais poliméricos, a técnica começou a ser conhecida como impressão 3D e a ser estudado a aplicabilidade a outros tipos de materiais. No início dos anos 2000 o termo passou a ser amplamente utilizado e, também, já era possível encontrar as primeiras máquinas de manufatura aditiva para metalurgia do pó (BACKMAN, 2020).

As inúmeras vantagens possibilitadas pela Manufatura Aditiva é o principal motivo do grande crescimento da adoção da técnica tanto no setor industrial, no setor acadêmico e em setores de pesquisa e desenvolvimento. Com a difusão, aumento da acessibilidade e a redução de custo, é previsto uma ascensão ainda maior nos próximos anos liderado pelas tecnologias envolvidas na chamada indústria 4.0. (THOMAS, 2016)

Dentre as técnicas existentes para deposições e fabricação de peças metálicas pode-se destacar o processo *Selective Laser Melting* (SLM) e o *Direct Energy Deposition* (DED). No processo SLM sucessivas camadas de pó são depositadas e posteriormente um feixe de laser funde regiões especificamente definidas a fim de construir a peça desejada. Já no processo DED partículas do material a ser depositado (podendo ser partículas ou fio metálico) é fundido por um laser ou feixe de elétrons durante a trajetória, antes de atingir a superfície do substrato (MERGULHÃO, 2017).

A Manufatura Aditiva, apesar de ser mais conhecida para a fabricação e construção de peças, também pode ser utilizada para deposição de revestimentos, sendo útil no recobrimento e reparo de ferramentas ou até mesmo a sua construção. O método DED se mostra mais aplicável quando se trata de revestimento de superfícies enquanto o método SLM é mais aplicável em construção de peças. (MERGULHÃO, 2017).

A técnica de DED, especificamente sistemas alimentados por pós/partículas (*powder-fed system*) suporta quase todos tipos de materiais, sendo aplicável para uma grande faixa de metais. Além disso, se comparado com outras técnicas de reparo convencionais essa técnica apresenta algumas vantagens como por exemplo menor entrada de calor, empenamento e distorção, resultando em peças com excelente ligação metalúrgica entre as camadas

depositadas, isso tudo somado às vantagens da MA, como por exemplo a alta precisão e adequação à automação total (SABOORI, et al, 2019).

Com o mercado cada vez mais dinâmico e competitivo, esses métodos precisam ser otimizados visando obter peças de melhor qualidade e ao mesmo tempo com altas taxas de produção, para assim satisfazer as necessidades da indústria. Tratando-se especificamente de revestimentos metálicos é necessário que as camadas do material depositado tenham ótima adesão ao substrato, assim como elevada resistência ao desgaste. Para tal, materiais de elevadas durezas são utilizados como revestimentos. No caso do carbetto de tungstênio aglomerado com cobalto (WC-Co), o WC oferece resistência ao desgaste e o Co confere elevada tenacidade e resistência ao impacto, propriedades importantes para ferramentas, sobretudo ferramentas de corte (DOS SANTOS TORRES, C.; SCHAEFFER, L, 2009). Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo estudar os parâmetros mais influentes na deposição de WC-17Co e WC-7Ni-19Cr em aços AISI H13 e AISI 4140 utilizando o método *Direct Energy Deposition (DED) powder-system*. Para estudo das diferentes deposições foram utilizadas variações dos seguintes parâmetros: velocidade de varredura e potência do feixe de laser. Os revestimentos foram caracterizados por meio de microscopia confocal a laser, microdureza Vickers e ensaios de desgaste microadesivo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Manufatura Aditiva (MA)

Segundo a ASTM F2792-12a, o termo Manufatura Aditiva (*Additive Manufacturing*) está definido como “um processo de unir materiais para fazer objetos a partir de dados de modelo 3D, geralmente camada sobre camada, em oposição às metodologias de manufatura subtrativa. Sinônimos: fabricação aditiva, processos aditivos, técnicas aditivas, fabricação de camadas aditivas, fabricação de camadas e fabricação de forma livre.” (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012).

O processo pode ser melhor entendido quando definido em oito etapas necessárias, em geral, para a produção de uma peça (GIBSON, et al., 2009). As seqüências dessas etapas podem ser observadas na Figura 1.

Figura 1 - Sequência de etapas para a fabricação de uma peça por Manufatura Aditiva



Fonte: (GIBSON et al, 2009 – adaptado)

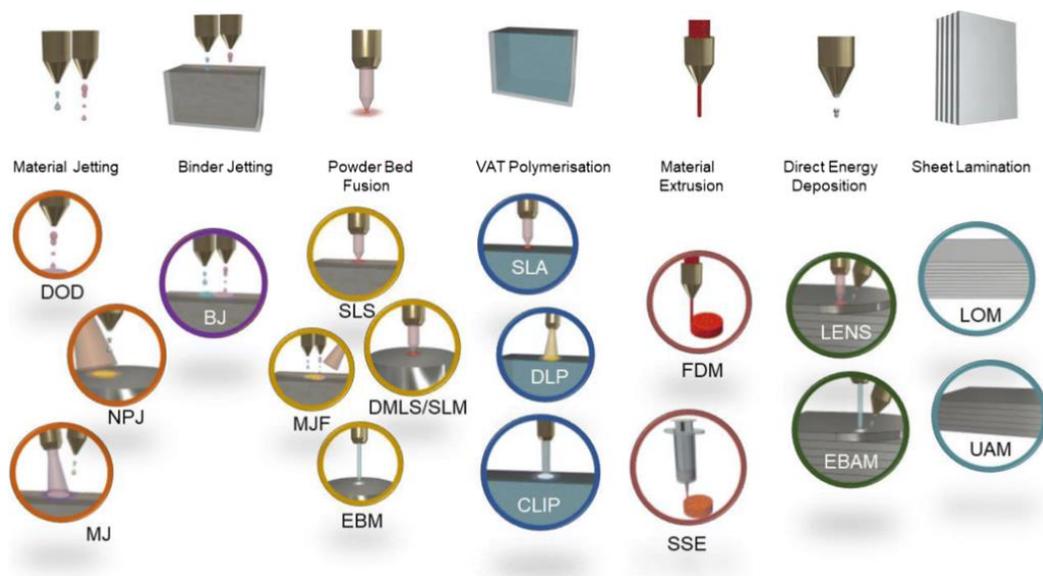
Algumas características da manufatura aditiva como por exemplo a facilidade, a redução do número de etapas no processo de fabricação de uma peça/objeto, a possibilidade da obtenção de geometrias inéditas e complexas e, principalmente, a economia de material, permitiram com que a técnica fosse adotada, primeiramente, por designers e projetistas com o objetivo de produzir maquetes ou protótipos de projetos e eventualmente testar e apresentar antes da produção final. Aos poucos, com o desenvolvimento e a melhoria de equipamentos e materiais,

a técnica também começou a ser utilizada para produção de peças para usos finais que muitas vezes seriam inviáveis ou não seriam possíveis de serem fabricadas. (RODRIGUES, et al., 2017).

Novas aplicações continuam sendo testadas e já são plenamente aplicáveis em indústrias de todos os tipos desde o desenvolvimento de peças mais leves e resistentes mecanicamente para indústria aeroespacial, até o desenvolvimento de próteses em ligas biocompatíveis e sob medida para a área médica. A diversidade de aplicações possíveis aumenta com o desenvolvimento ou adequação de novos materiais para a técnica a qual já abrange todas as áreas de materiais (metais, cerâmicas, polímeros e compósitos) e alguns materiais inusitados como alimentos, concreto, papel e tecidos humanos (NGO et al.; 2018).

Existem diversos processos baseados em diferentes princípios de funcionamento e de construção os quais são classificados em famílias de processos que se identificam em algumas características. Todos eles podem ser chamados de Manufatura Aditiva e foram divididos em 7 categorias de processos aditivos (Figura 2) por uma padronização da ASTM e da ISO com objetivo de facilitar a diferenciação e evitar confusão dentro dessa nova área da manufatura (ASTM International F2792-12a, 2012).

Figura 2 - Resumo das categorias de Manufatura Aditiva e suas tecnologias



Fonte: (VITHANI, K. et al, 2019)

Observa-se que dentro de cada família podem existir um ou mais processos com nomes/siglas diferentes que às vezes, por falta de conhecimento, podem causar confusão, porém funcionam sob um mesmo princípio. Também ao se conhecer a classificação dessas famílias, é possível saber com qual técnica trabalhar, pois cada uma tem a suas limitações e vantagens.

- **Vat Photopolymerization:** processo no qual um fotopolímero líquido em uma cuba é submetido a polimerização ativada seletivamente por uma fonte de luz.
- **Material Extrusion:** processo no qual material é dispensado seletivamente através de um bico ou orifício.
- **Material Jetting:** processo no qual gotículas do material de construção são depositadas seletivamente.
- **Binder Jetting:** processo no qual o agente ligante líquido é seletivamente depositado para juntar materiais em pó.
- **Powder Bed Fusion (PBF):** processo no qual energia térmica é usada para fundir seletivamente regiões de um leito de pó.
- **Direct Energy Deposition (DED):** processo em que energia térmica focalizada é usada para fundir, seletivamente, materiais por fusão à medida que são depositados.
- **Sheet Lamination:** processo no qual folhas de materiais são unidas para formar uma peça.

2.2 História da Manufatura Aditiva

A história da Manufatura Aditiva se inicia na década de 80, onde pesquisadores começaram a estudar e desenvolver um método de prototipagem rápida (*rapid prototyping*). Depois de alguns estudos em técnicas preliminares, Charles Hull submeteu uma patente envolvendo construção de peças utilizando resinas fotossensíveis, com o nome de estereolitografia. Na mesma década, Hull também foi responsável por fundar a 3D Systems, uma empresa que até hoje contribui para crescimento de novas tecnologia na área da manufatura aditiva (BACKMAN, 2020).

Logo em seguidas aumentaram as tentativas de desenvolver novas máquinas, e aos poucos, novas técnicas e outras empresas foram fundadas. Ainda na década de 80, as primeiras impressoras 3D começaram a ser comercializadas concentradas nas técnicas de SLM (*Selective*

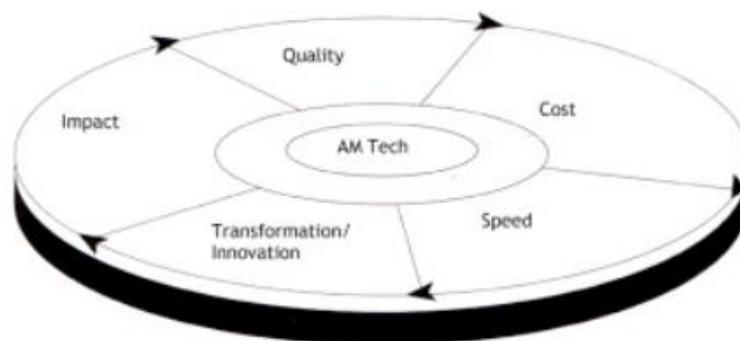
Laser Melting), SLS (*Selective Laser Sintering*) e FDM (*Fused Deposition Method*), restringidas para materiais poliméricos. A década de 90 ficou marcada por um aumento de desenvolvimentos de softwares CAD de modelagem 3D, facilitando na etapa de desenho e design das peças. Nos anos 2000, com as primeiras patentes começando a perder a validade, houve a popularização das impressoras 3D, tornando mais acessíveis e, conseqüente, mais estudos, aplicações e aprimoramento da manufatura aditiva (BACKMAN, 2020).

2.3 Vantagens e desvantagens da Manufatura Aditiva

A Manufatura Aditiva possibilita diversas vantagens que podem auxiliar desde o processo de desenvolvimento de projetos e produtos, reparos e até mesmo na linha final de produção. Ao contrário dos processos de manufaturas tradicionais, conhecidos como manufatura subtrativa, a manufatura aditiva elimina diversas etapas de processamento economizando tempo e, ao mesmo tempo, reduzindo o gasto de matéria-prima. Essas vantagens implicam em agilidade da execução de projetos, resolução de problemas e muitas vezes na quebra do modelo tradicional utilizado pelas indústrias (ATTARAN, 2017).

Os principais benefícios da Manufatura Aditiva giram em torno de 5 pontos: custo, velocidade, transformação/inação, impacto e qualidade, como pode ser observado na Figura 3. Não é esperado que a Manufatura Aditiva substitua totalmente os métodos tradicionais de fabricação, porém espera-se que baseados nesses benefícios permita uma revolução e um grande crescimento em diversas áreas do mercado (ATTARAN, 2017).

Figura 3 – Os 5 principais benefícios da MA comparados com os processos convencionais



Fonte: (ATTARAN, 2017)

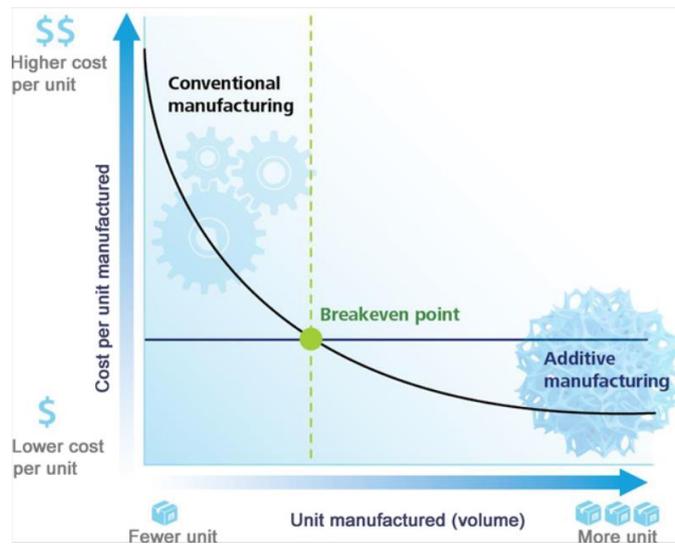
Os benefícios podem ser adotados na prototipagem rápida, na produção em pequenos volumes, na customização de produtos, na produção peças de alta complexibilidade e permite compatibilidade com produção sob demanda e *on-site*, eliminação de estoques e rede de fornecedores complexas, possibilidade de reparos rápidos e de peças obsoletas e otimização topológica (VICARI and KOZARSKY, 2013).

Em contrapartida, existem algumas desvantagens características do processo, como por exemplo limitações relativas à grandes geometrias e grandes produções, custos elevados dos equipamentos e matérias primas e propriedades mecânicas inferiores e anisotrópicas, representando um desafio para expansão e adoção da Manufatura Aditiva. Alguns desses desafios são mais pronunciados em um método ou material de impressão específico e espera-se, com a pesquisa e o estudo de novos materiais e adaptações tecnológicas, corrigir algumas dessas desvantagens (NGO et al.; 2018).

2.4 Quando adotar a Manufatura Aditiva?

Apesar dos inúmeros benefícios relacionados à Manufatura Aditiva é importante salientar que a adoção da técnica deve ser analisada caso a caso, pois como todos os processos existem limitações que inviabilizam sua produção ou utilização em determinados casos. É importante levar em consideração, por exemplo, o volume de produção e o correspondente custo por unidade produzida. Como mostrado na Figura 4, alguns processos convencionais podem apresentar um custo unitário menor quando comparado com processos de Manufatura Aditiva, existindo sempre um ponto (*breakeven point*) onde a partir de certo número de unidades, a sua adoção se mostra benéfica. (ATTARAN, M., 2017)

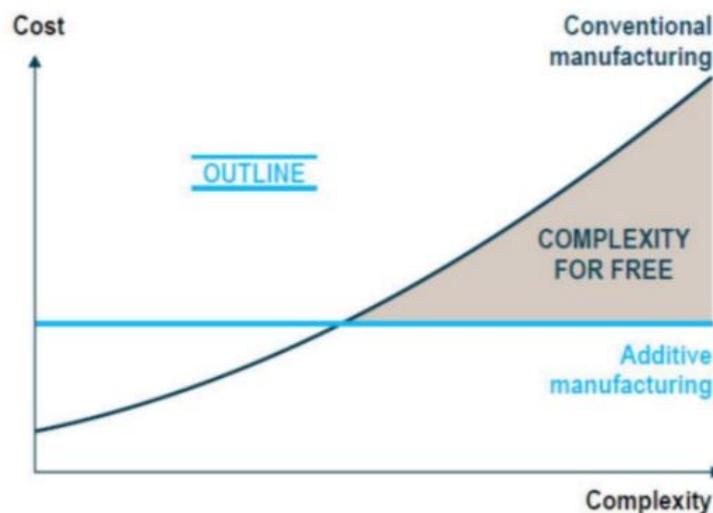
Figura 4 – Relação entre volume e custo de produção por unidade (manufatura aditiva X técnicas de manufatura convencionais)



Fonte: (ATTARAN, 2017)

Outro fator importante e que deve ser levado em consideração é a complexibilidade geométrica da peça a ser fabricada. Assim como observado na Figura 5, geometrias menos complexas às vezes podem ser obtidas por técnicas convencionais de manufatura com um menor custo, da mesma forma, geometrias altamente complexas são possíveis de serem obtidas por manufatura aditiva por custo menor. (ATTARAN, M., 2017) Portanto cabe analisar o caso para identificar se a manufatura aditiva é vantajosa para a situação.

Figura 5 – Relação entre complexibilidade e custo (manufatura aditiva X técnicas de manufatura convencionais)



Fonte: (ATTARAN, 2017)

2.5 Manufatura Aditiva em metais

Existe uma grande diversidade de materiais compatíveis com as técnicas de manufatura aditiva, porém os metais merecem uma maior atenção pois representam as maiores aplicações e de grande importância, como em indústrias aeroespacial, automobilística e médica. A grande diferença é a elevada resistência mecânica desses tipos de materiais que se intensifica com o fato de as tecnologias de manufatura aditiva em metais possibilitar controlar os parâmetros de deposições com o objetivo de refinar os grãos e otimizar as microestruturas (ISAZA, et al., 2018).

Um dos maiores desafios é entender como os metais e as ligas metálicas se comportam em um processo onde ciclos térmicos repetido levam a uma solidificação rápida, resfriamento direcional e transformações de fase induzidas. Esses fatores implicam em uma maior complexidade para a análise da evolução microestrutural e propriedades não tipicamente encontradas em processos convencionais. (FRAZIER, 2014)

Os processos de manufatura aditiva nos quais podem ser utilizados metais podem ser classificados em duas categorias: *powder-bed systems* e *powder-fed systems*.

Os sistemas classificados como *powder-bed systems*, também conhecido em português como sistemas leito de pó, utilizam um método de deposição de pó que consiste em um mecanismo para espalhar uma fina camada de pó (20 a 100 μm de espessura) sobre uma placa de substrato e um reservatório de pó. Após a distribuição de uma camada de pó, um feixe de energia é aplicado para fusão (pó e substrato) localizadamente a região desejada. Normalmente, são utilizados laser de alta potência sob atmosfera inerte. O processo é repetido camada por camada seguindo a trajetória necessária para formar a peça desejada e, ao final, o pó não derretido é removido reatando apenas a peça com a geometria desejada (ISAZA, et al., 2018).

Comercialmente existem diferentes nomenclaturas que representam tecnologias de *power-bed systems*: *Selective Laser Melting* (SLM), *Laser Cusing and Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) e *Electron Beam melting* (EBM), que se diferencia dos demais por usar um feixe de elétrons sob vácuo total.

Já os sistemas classificados como *powder-fed systems*, são baseados em uma deposição automatizada de alta precisão onde camadas do material vão sendo adicionadas à medida que o pó flui através de um bocal (*nozzle*), sendo fundido e aderindo na superfície da peça ou metal

base. A fonte de energia desse processo também pode ser um laser ou feixe de elétrons, podendo também apresentar atmosfera inerte (ISAZA, et al., 2018).

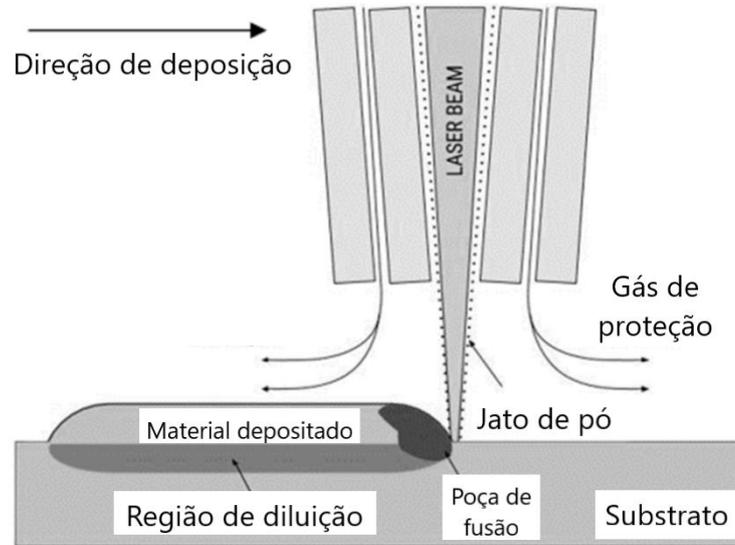
As tecnologias disponíveis possuem nomenclaturas comerciais como por exemplo: *Laser Cladding*, *Directed Energy Deposition* (DED), *Laser Metal Deposition* (LMD) e *Laser Engineered Net Shaping* (LENS).

O processo é altamente preciso e baseado na deposição automatizada de camada de material com espessuras próximas a 0,1 mm. A ligação metalúrgica do material de revestimento com o material de base e a ausência de rebaixamento são algumas características desse processo. Diferentemente de outras técnicas de soldagem, em que uma baixa entrada de calor penetra no substrato, *powder-fed systems* apresentam Zona Termicamente Afetada (ZTA), a qual depende de alguns parâmetros controladores do processo. No caso, a fonte de energia é normalmente um laser de alta potência, mas os sistemas de última geração podem usar dois ou mais lasers com diferentes potências e também aparelhagens para deposição sob atmosfera inerte (ISAZA, et al., 2018).

2.6 *Direct Energy Deposition* (DED)

Direct Energy Deposition pode ser definido como um processo em que o material, em forma de pó ou arame, é entregue diretamente em uma poça de fusão gerada por uma fonte de calor formando camadas sobre um substrato. O material fornecido e a superfície do substrato ou camada são fundidos utilizando um feixe de laser ou elétrons (SABOORI et al., 2019).

Figura 6 – Desenho esquemático do funcionamento do processo DED



Fonte: (SABOORI et al., 2019).

Outras nomenclaturas do processo podem ser encontradas, como por exemplo *Laser cladding* (LC), *Laser Energy Net Shaping* (LENS) ou *Laser Metal Deposition* (LMD), não se limitando em somente construção de peças, mas também reparos precisos e revestimentos. Os revestimentos se mostram importantes aplicações pois conferem ao substrato resistências ao desgaste e/ou à corrosão, aumentando a vida útil de algumas peças de alto valor, como mostrado em (LI et al., 2019).

2.7 Laser Cladding

Laser cladding é uma das técnicas classificadas como *powder-fed system* a qual consiste em um processo que utiliza um laser de alta potência para derreter o material a ser depositado, liberado por um sistema alimentador de pó. Geralmente, o processo é utilizado para revestimentos de grandes superfícies realizando deposições de trilhas individuais sobrepostas. A compatibilidade de uma grande variedade de materiais implica em diversas aplicações e estudos, sobretudo em relação à engenharia de superfícies, onde são otimizadas propriedades como por exemplo, resistência à corrosão e resistência ao desgaste (VILLAR, 1999).

O processo pode ser realizado de duas formas: em um processo único (*single-step process*), onde o pó é alimentado continuamente ou em duas etapas (*two-step process*), onde primeiramente é depositado uma fina camada de um material que possa ser termicamente

ativado, geralmente em forma de pasta, e posteriormente aplica-se o laser de maneira localizada. (VILLAR, 1999).

Em termos de revestimento, o processor de *laser cladding* é bem mais utilizado devido menores gastos e maior facilidade de manuseio, e atualmente, a técnica de deposição de forma única (*single-step*) também pode produzir geometrias e caracterizar como um processo aditivo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Deposição dos revestimentos

Foram depositadas camadas de WC-17Co e WC-7Ni-19Cr por meio de MA-DED *powder-fed system* a laser sobre substratos de aços AISI H13 e AISI 4140, utilizando um equipamento da marca BeAM modelo Modulo 250 controlado pelo Siemens 840D Control. Apresenta-se na Figura 7 o equipamento fabricado pela BeAM modelo Modulo 250 utilizado nas deposições.

Figura 7 - Equipamento fabricado pela BeAM modelo Modulo 250 utilizado nas deposições



Fonte: Foto do autor

Antes das deposições de MA, os substratos (com 5 mm de espessura) foram submetidos a tratamentos de têmpera e revenimento. As condições de tratamentos utilizadas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Condições de tratamentos de têmpera e revenimento utilizados para os aços AISI H13 e AISI 4140.

Material	Austenitização		Meio de têmpera	Revenimento	
	Temperatura	Tempo em caixa com carvão		Temperatura	Tempo
AISI H13	1030 °C	4 horas	Óleo	540 °C	2 horas
AISI 4140	870 °C	4 horas	Óleo	200 °C	1 hora

Fonte: Próprio autor

A deposição é resultado de configurações, parâmetros e estratégias. A primeira configuração realizada foi em relação ao posicionamento do laser, com o objetivo de garantir a centralização do *laser beam* em relação ao *nozzle* e a distância correta entre *nozzle* e o substrato, que é de 3,5 mm, onde ocorrerá a deposição.

Para a deposição, foram utilizados diferentes parâmetros para produzir traços linear de 15 mm separados um dos outros para, posteriormente, avaliar o resultado da variação de cada parâmetro. Foram utilizadas 2 velocidades de deposição (300 e 500 mm/min) e 3 potências de laser (250, 350 e 450 W), possibilitando 6 diferentes configurações para estudo.

Em seguida foi analisado qual das linhas apresentou melhor resultado, selecionado uma combinação de velocidade de deposição e potência do laser que apresentasse boa aderência, sem destacamento da camada e ao mesmo tempo uma Zona Termicamente Afetada (ZTA) menor possível, evitando influências nas propriedades e na possível continuação do processo.

3.1.1 Taxa de alimentação do pó

A taxa de alimentação do pó está relacionada ao gás de arraste que leva o particulado até o *nozzle*. Foi utilizado argônio para a proteção do laser e da poça de fusão contra contaminação e oxidação, sendo aplicado coaxialmente a partir de 3 fluxos: *nozzle* (3 l/mm), *carrier* (3 l/mm) e *former* (6 l/mm).

3.1.2 *Overlapping*

Definido como a porcentagem em que um traço se sobrepõe ao outro para produzir superfícies livres de poros e de uma forma uniforme, evitando rugosidades na superfície final. No presente caso, será apenas definido um valor de 1/3 de sobreposição, já incluso no código de programação utilizado para deposição.

3.2 Análise microestrutural

A preparação metalográfica das secções transversais dos revestimentos produzidos, foi realizada no Laboratório de Análises Metalográficas do SMM da EESC/USP. As foram identificadas e embutidas de modo a se observar a região do corte transversal. Em seguida, foram lixadas e polidas (utilizando lixas de SiC: 80, 140, 220, 320, 400, 600, 1000 e 1200 mesh) e solução de alumina 0,05µm. Para a visualização microestrutural do aço AISI 4140 foi realizado o ataque químico com Nital 2% (2 ml HNO₃ + 98ml álcool etílico) durante 10 segundos, para o aço AISI H13 foi utilizado o reagente químico Vilella (5ml HCl + 2g ácido pícrico + 100ml álcool etílico) durante 10 segundos. Após a preparação metalográfica, os revestimentos foram analisados por meio de microscopia confocal a laser, utilizando o equipamento fabricado pela Olympus, modelo OLS4000 com câmera integrada, localizado no laboratório de metalografia do NUMA/SEP – EESC/USP.

3.3 Ensaio de microdureza Vickers

Para analisar a dureza dos substratos e revestimentos produzidos, foi realizado o ensaio de microdureza Vickers (HV), utilizando um microdurômetro fabricado pela Buheler, modelo 1600-6300, seguindo a norma ASTM E384-17. Além das durezas médias, também foram obtidas medidas de durezas do revestimento conforme a distância da superfície (perfis de microdureza), realizando uma série de medidas com um espaçamento pré-definido entre elas para avaliar a evolução dessa propriedade da superfície em direção ao centro do substrato.

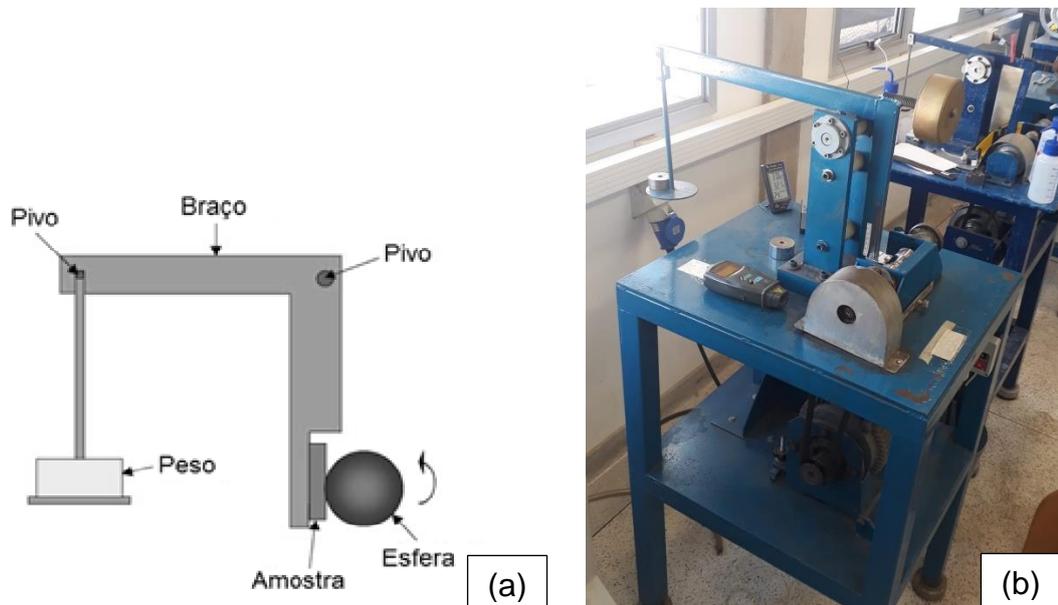
Para os ensaios, foi utilizado um *load time* (tempo de carregamento) de 15 segundos e com uma carga de 200 gf.

3.4 Ensaios de desgaste

As resistências ao desgaste, tanto para os revestimentos produzidos quanto para os substratos, foram avaliadas por meio dos ensaios de desgaste microadesivo, como descrito em

(ESTEVEES et al., 2019). Os equipamentos foram construídos e instalados no Laboratório de Engenharia de Superfícies do SMM - EESC/USP. Apresenta-se na Figura 8 o desenho esquemático do funcionamento do ensaio, bem como a fotografia do equipamento utilizado.

Figura 8 - (a) Esquema do funcionamento de um ensaio de microadesivo. (b) Máquina de ensaio de desgaste microadesivo (Laboratório de Engenharia de Superfícies SMM-EESC)



Fonte: Foto do autor

Os ensaios de desgaste microadesivo foram realizados nas amostras depois de lixadas (utilizando lixas de 80, 140, 220, 32, 400, 600, 800, 1000 e 1200 mesh) e polidas em suspensão de alumina de $0,05 \mu\text{m}$, com objetivo de obter uma área lisa e livre de qualquer interferência para um ensaio em escalas micro. Para cada ensaio, foi utilizado uma esfera de aço (AISI 52100) de 1 polegada devidamente limpa para evitar interferências. Foram realizados 4 ensaios com tempos de duração diferentes (5, 10, 15 e 20 minutos), ambos com carga ($300 \text{ g} = 5,25 \text{ N}$), sob uma mesma rotação de 265 rpm.

Cada ensaio foi repedido 4 vezes em cada amostra, para obtenção dos volumes removidos médios e respectivos desvios padrão. Esses parâmetros foram definidos para evitar que qualquer elemento interfacial influencie no efeito das características microestruturais durante os ensaios.

Os produtos desses ensaios foram regiões desgastadas em forma de calota, sendo seus diâmetros médios usados para as obtenções dos volumes desgastados conforme a Equação 1 onde, V : volume removido; d : diâmetro médio da calota formada e R : raio da esfera, 12,7 mm. A Equação 1 somente é válida quando a camada não é perfurada durante o ensaio (ORDOÑEZ, 2019).

$$V = (\pi \cdot d^4) / (64 \cdot R) \quad \text{para } d \ll R \quad \text{Equação 1}$$

Após a realização dos ensaios, as amostras foram limpas em acetona, para a remoção de resíduos decorrentes do desgaste. Em seguida as regiões das calotas foram observadas no microscópio confocal a laser para medição de seus diâmetros.

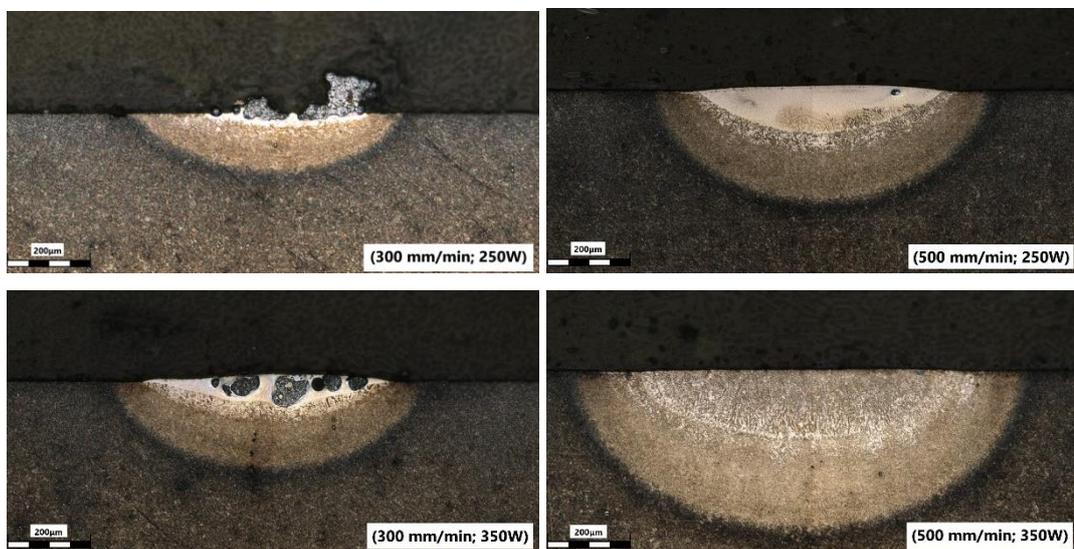
Foi utilizado o software ImageJ para medição dos diâmetros das calotas produzidas. Após a realização dos cálculos dos volumes removidos, para todos os tempos de ensaios, as curvas de desgaste foram obtidas plotando-se em gráficos os volumes removidos médios e seus respectivos desvios padrões (mm^3), em função das distâncias percorridas (m).

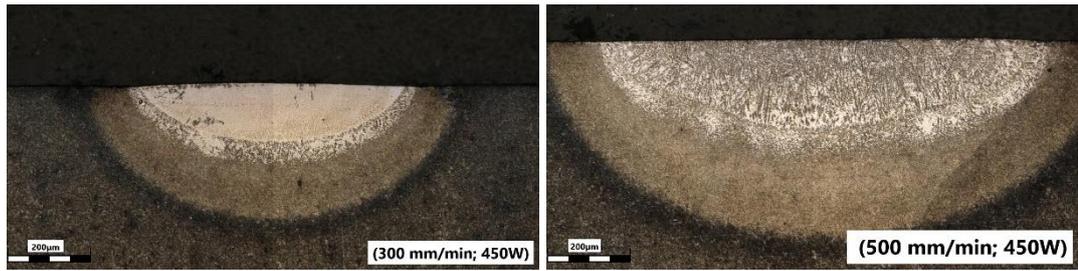
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As primeiras deposições realizadas tiveram como objetivo verificar os melhores parâmetros para as duas composições selecionadas para o estudo, WC-17Co e WC-7Ni-19Cr, e os dois substratos considerados, AISI H13 e AISI 4140. As escolhas das composições foram baseadas em testes preliminares realizados com intuito de verificar o comportamento e o resultado de diferentes composições de WC no processo DED.

Nas Figuras 9 a 12 são apresentadas as micrografias ópticas das seções transversais das camadas depositadas e seus correspondentes valores dos parâmetros utilizados.

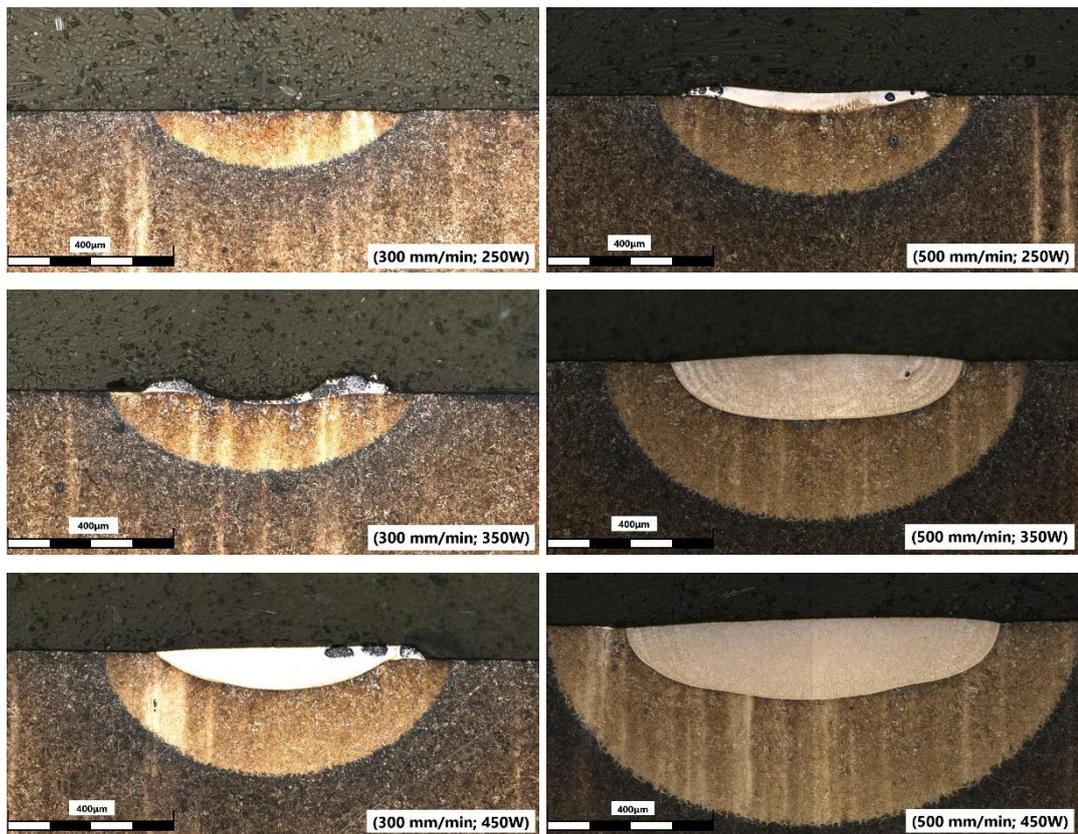
Figura 9 – Detalhes das seções transversais de WC-17Co depositados em AISI H13 utilizando diferentes configurações de velocidade de deposição e de potência.





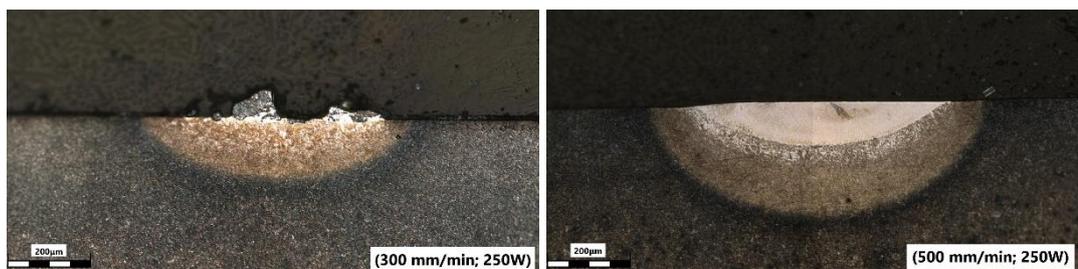
Fonte: Próprio autor

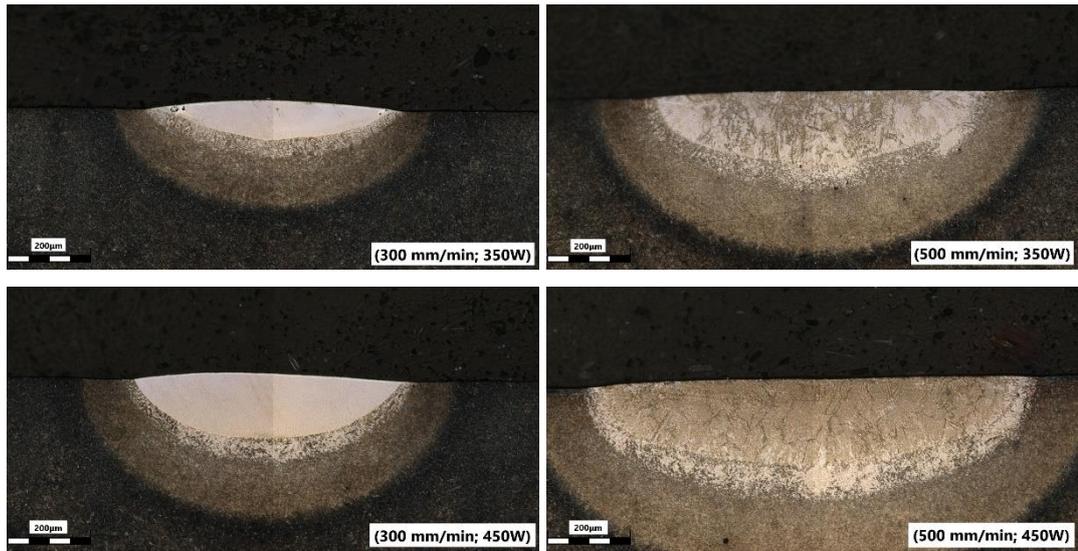
Figura 10 – Detalhes das seções transversais de WC-17Co depositados em AISI 4140 utilizando diferentes configurações de velocidade de deposição e de potência.



Fonte: Próprio autor

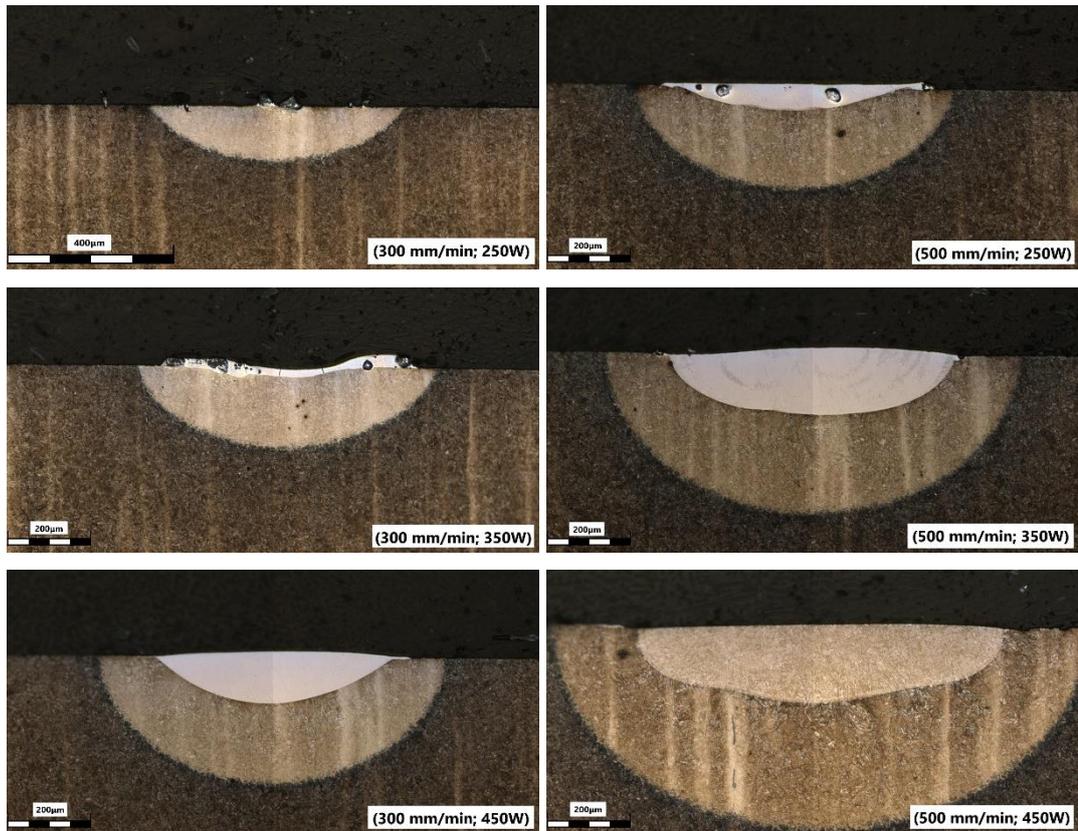
Figura 11 – Detalhes das seções transversais de WC-7Ni-19Cr depositados em AISI H13 utilizando diferentes configurações de velocidade de deposição e de potência.





Fonte: Próprio autor

Figura 12 – Detalhes das seções transversais de WC-7Ni-19Cr depositados em AISI 4140 utilizando diferentes configurações de velocidade de deposição e de potência.



Fonte: Próprio autor

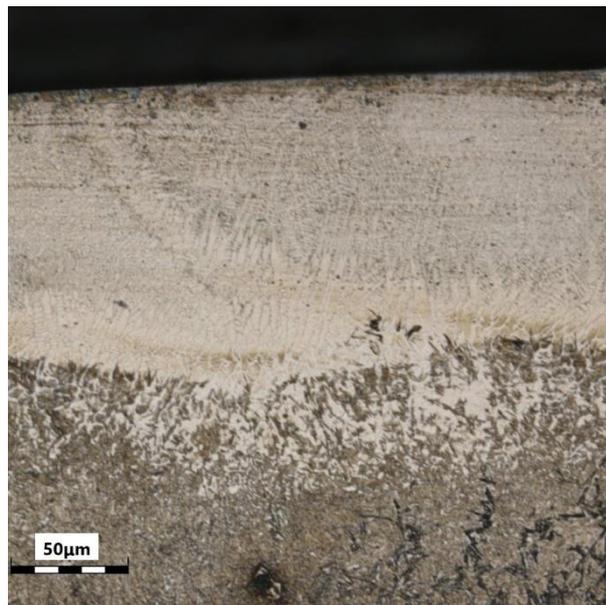
De um modo geral, a combinação da menor velocidade de deposição e da menor potência (300 mm/min; 250W) resultou em uma deposição bem irregular ou até mesmo na não deposição. Já a combinação da maior velocidade de deposição e da maior potência (500 mm/min; 450 W), apesar de ter resultado em uma boa quantidade de material depositado, não se mostrou interessante devido a grande região de ZTA.

Dentre as demais configurações, a que apresentou uma ZTA menor e uma boa deposição foi a combinação utilizando uma velocidade de deposição de 500 mm/min e uma potência de 250W, ficando definido assim o parâmetro para a deposição de ambos as composições e para os dois substratos.

Uma vez definido os parâmetros (500 mm/min; 250W), foi realizada a deposição de uma camada única em uma região suficiente para realização dos ensaios futuros.

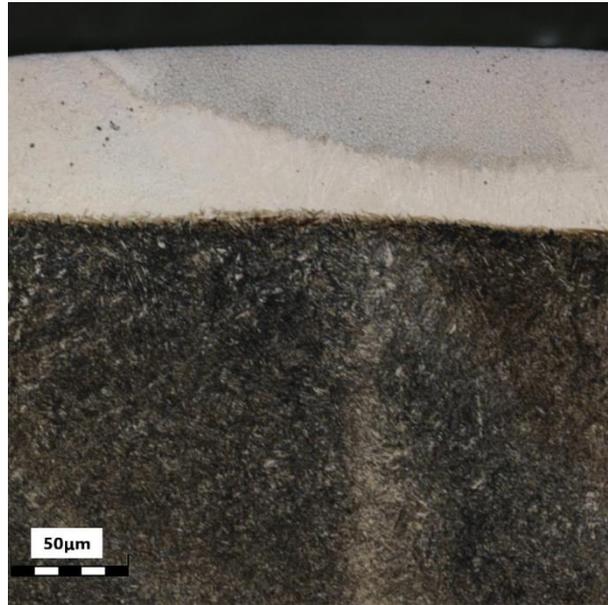
Nas Figuras 13 a 16 são apresentadas as camadas produzidas com os melhores parâmetros definidos.

Figura 13 – Detalhe da camada de WC-17Co depositada em AISI H13.



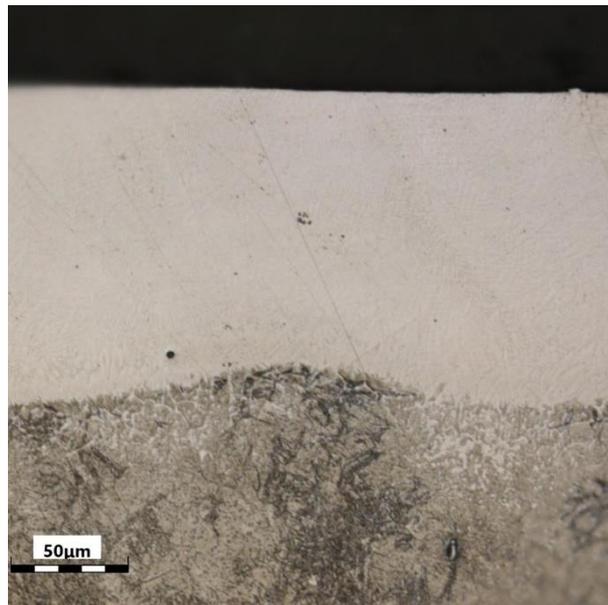
Fonte: Próprio autor

Figura 14 – Detalhe da camada de WC-17Co depositada em AISI 4140



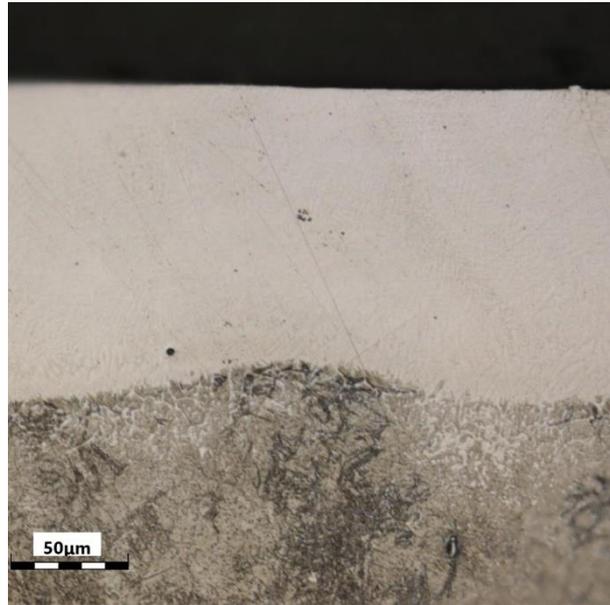
Fonte: Próprio autor

Figura 15 – Detalhe da camada de WC-7Ni-19Cr depositada em AISI H13.



Fonte: Próprio autor

Figura 16 – Detalhe da camada de WC-7Ni-19Cr depositada em AISI 4140.

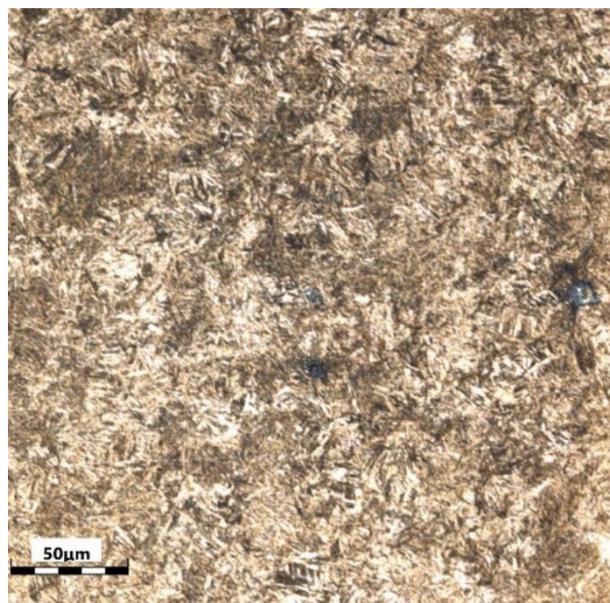


Fonte: Próprio autor

Verifica-se que é possível identificar uma fina e homogênea camada depositada e a Zona Termicamente Afetada (ZTA) de cada caminho percorrido pelo laser. Foram também observados poucos poros e algumas trincas em determinadas composições, mas que não afetaram a qualidade final, sem apresentar destacamento.

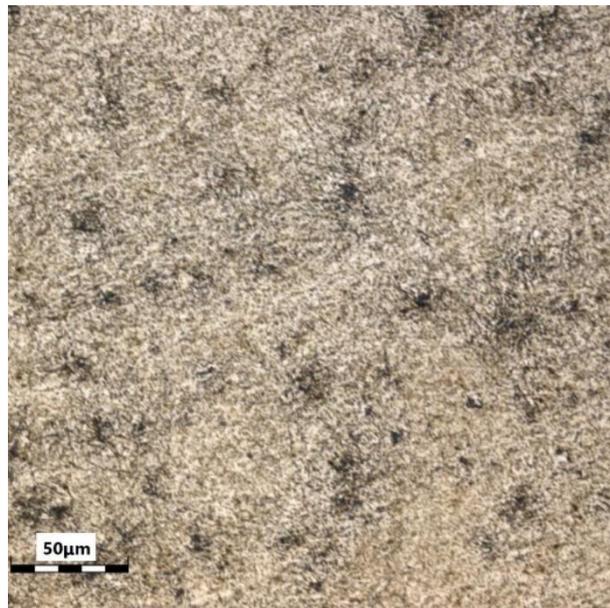
Com intuito de visualizar a ZTA de cada configuração ensaiada, também foram realizadas imagens mais detalhadas da região do substrato em comparação com a região da ZTA, apresentadas nas Figuras 17 a 22.

Figura 17 – Detalhe do substrato AISI 4140.



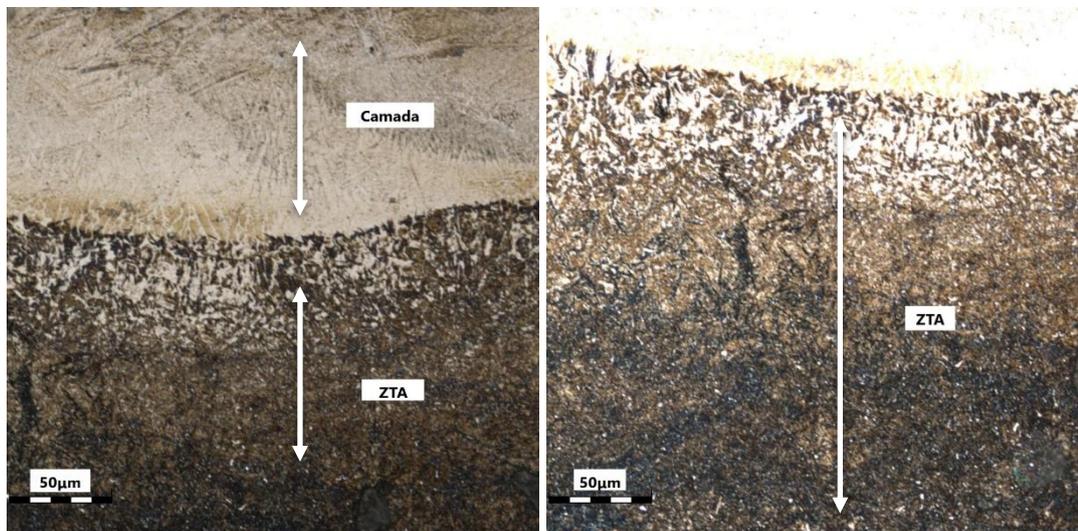
Fonte: Próprio autor

Figura 18 – Detalhe do substrato AISI H13.



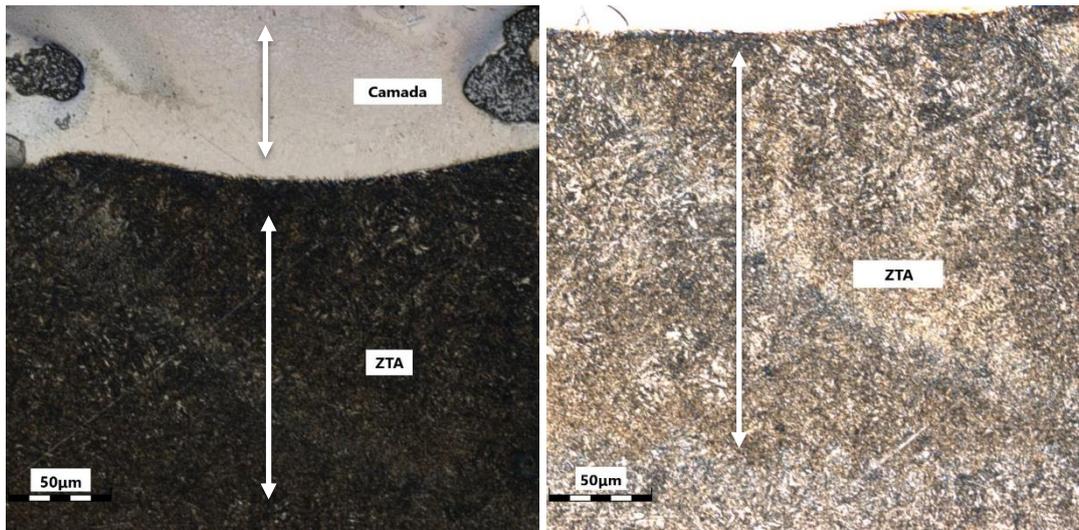
Fonte: Próprio autor

Figura 19 – Detalhe da camada e da ZTA para WC-17Co depositado em AISI H13.



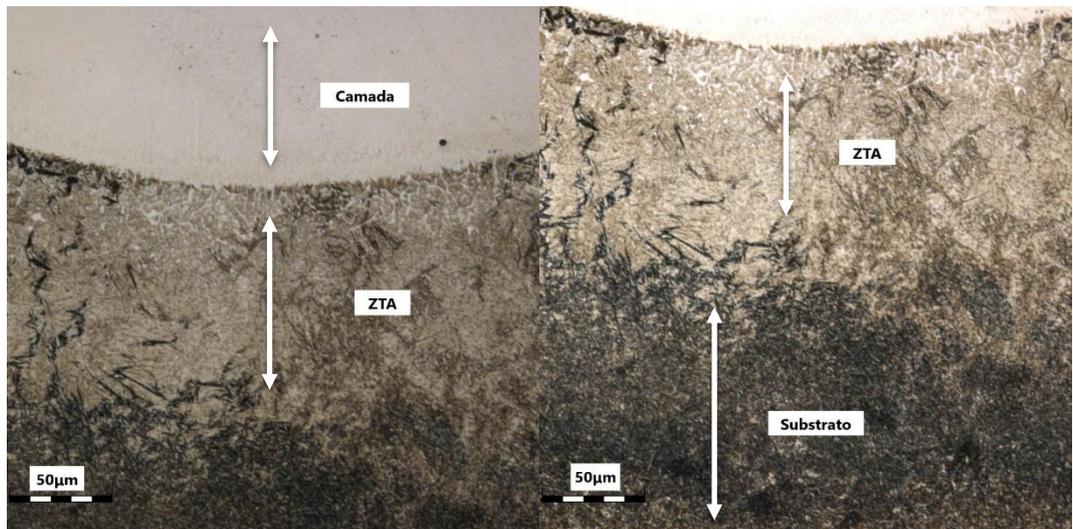
Fonte: Próprio autor

Figura 20 – Detalhe da camada e da ZTA para WC-17Co depositado em AISI 4140.



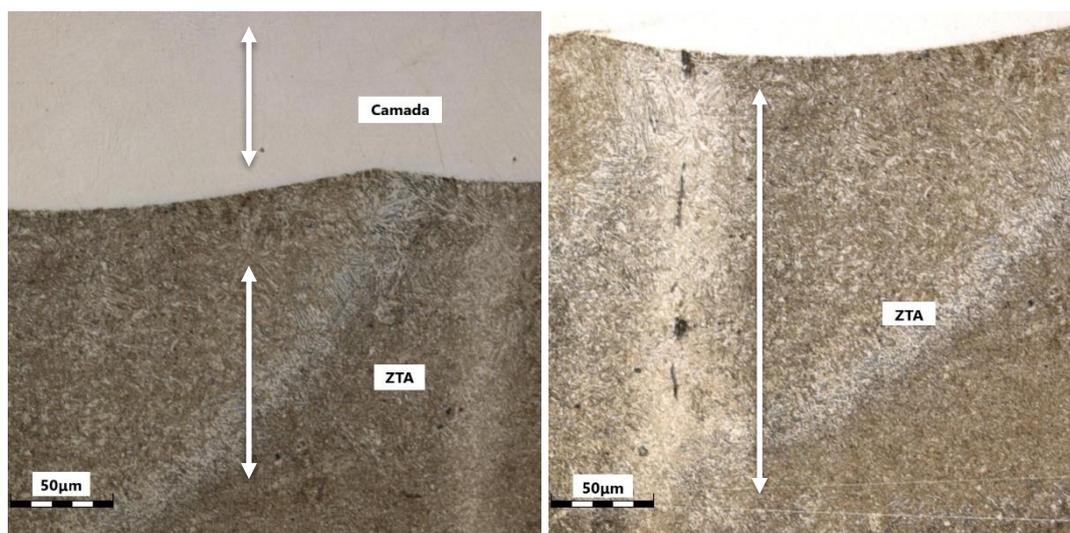
Fonte: Próprio autor

Figura 21 – Detalhe da camada e da ZTA para WC-7Ni-19Cr depositado em AISI H13.



Fonte: Próprio autor

Figura 22 – Detalhe da camada e da ZTA para WC-7Ni-19Cr depositado em AISI 4140.



Fonte: Próprio autor

Apresenta-se na Tabela 2 os respectivos valores médios e desvios padrões amostrais para as camadas produzidas.

Tabela 2 – Medidas médias dos ensaios de microdureza.

	Substrato	WC-17Co	WC-7Ni-19Cr
AISI H13	578,42 ± 35,51 HV	935,35 ± 128,25 HV	617,46 ± 61,49 HV
AISI 4140	532,51 ± 34,31 HV	973,53 ± 137,83 HV	954,95 ± 149,01 HV

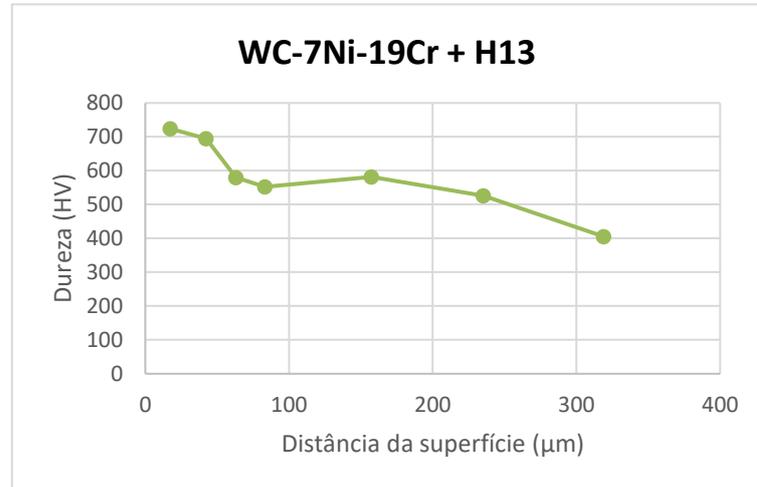
Fonte: Próprio autor

Verifica-se que em todas as configurações de deposições conferiram valores de microdureza superior à dureza do substrato, atingindo valores médios bem próximos. Apenas a deposição de WC-7Ni-19Cr em H13 resultou em um valor menor se comparado às outras deposições, isso pode ser justificado a defeitos localizados. Também, é possível observar que os testes nas camadas produzidas possuem um desvio padrão maior, quando comparado aos dos substratos, justificado por valores obtidos mais diferentes uns dos outros devido a deposição apresentar regiões de diferentes microestruturas e/ou concentração de defeitos, inerentes do processo.

Também foram realizados perfis de microdureza Vickers para cada amostra, partindo da superfície em direção ao substrato. Nas Figuras 23 a 26 são apresentados os resultados de

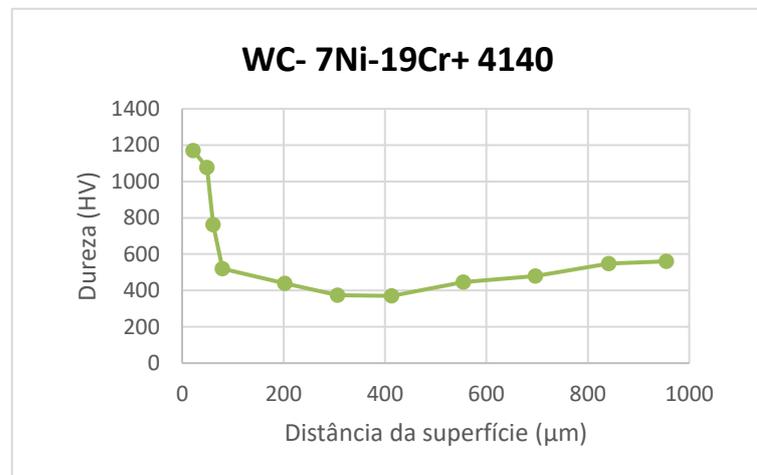
gradiente de dureza conforme se afasta da superfície e da camada depositada. Também é possível identificar a região de ZTA (Zona de Termicamente Afetada).

Figura 23 – Perfil de microdureza Vickers para a camada WC-7Ni-19Cr depositada em AISI H13.



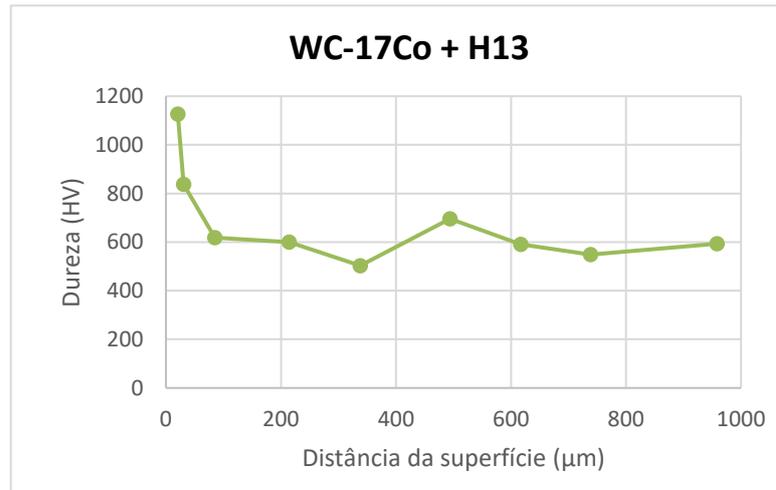
Fonte: Próprio autor

Figura 24 – Perfil de microdureza Vickers para a camada WC-7Ni-19Cr depositada em AISI 4140.



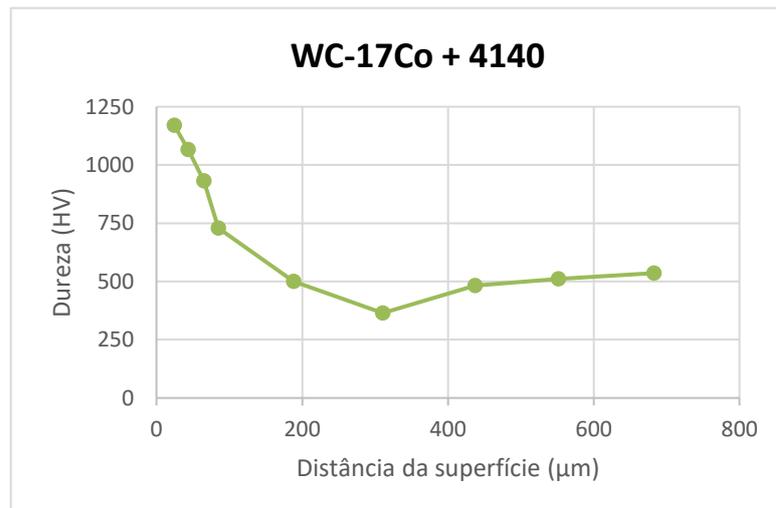
Fonte: Próprio autor

Figura 25 – Perfil de microdureza Vickers para a camada WC-17Co depositada em AISI H13.



Fonte: Próprio autor

Figura 26 – Perfil de microdureza Vickers para a camada WC-17Co depositada em AISI 4140

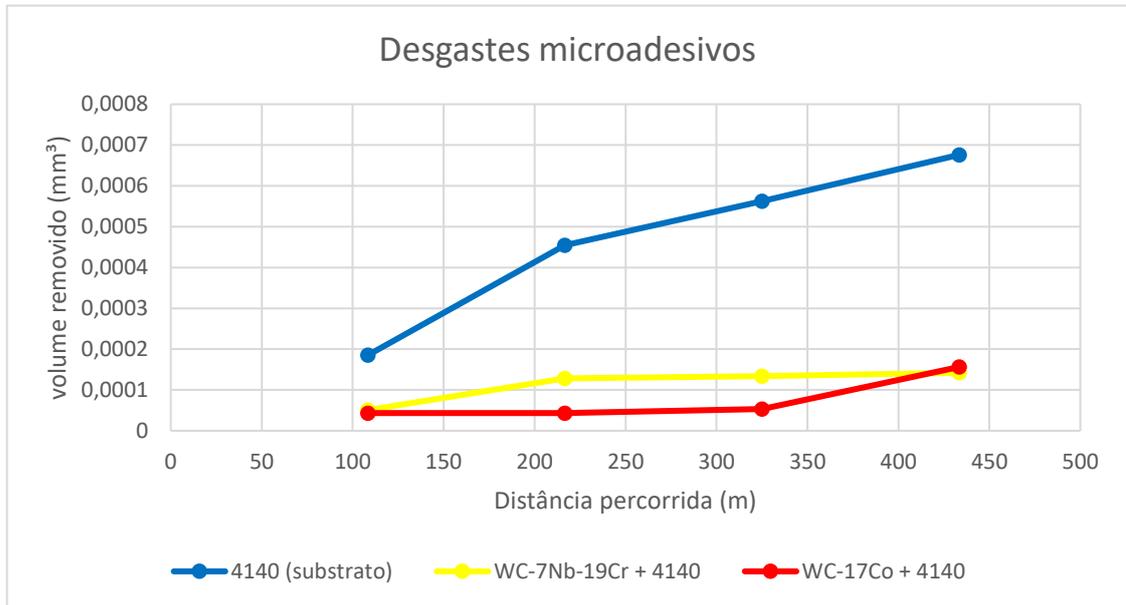


Fonte: Próprio autor

É possível identificar uma elevada dureza (acima da dureza média calculada) na região bem próxima à superfície e, logo em seguida, uma redução, como era de se esperar. Logo abaixo da camada depositada são observados alguns valores de dureza inferior ao valor da dureza média do substrato, como consequência dos fenômenos térmicos causados na ZTA durante o processo. Passando a região da ZTA, os valores começam a se estabilizar em torno da dureza média do metal do substrato.

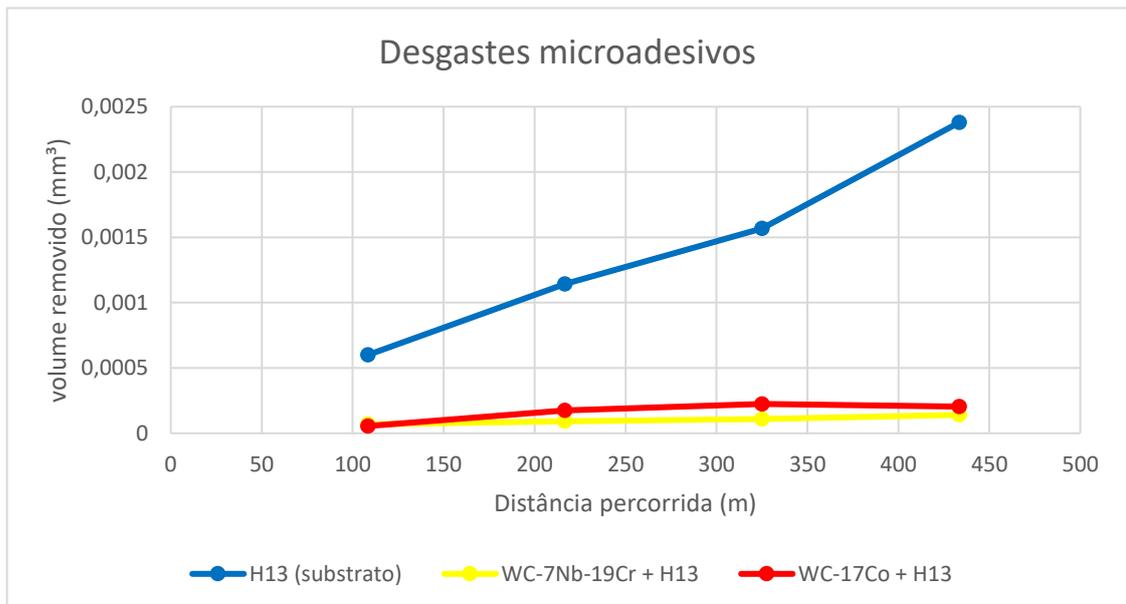
Nas Figuras 27 e 28 são apresentados os gráficos de desgaste microadesivo para os substratos, juntamente com as camadas produzidas.

Figura 27 – Resultado comparativo dos ensaios de desgastes microadesivo para deposições utilizando AISI 4140 como substrato.



Fonte: Próprio autor

Figura 28 – Resultado comparativo dos ensaios de desgastes microadesivo para deposições utilizando AISI H13 como substrato.



Fonte: Próprio autor

As camadas produzidas apresentaram maior resistência ao desgaste quando comparadas aos substratos. Entre as melhores deposições, estão as configurações utilizando o AISI H13 como substrato, as quais apresentaram menor volume de material removido, com destaque a composição WC-7Ni-19Cr. Mesmo assim, os resultados são relativamente próximos, assim como os resultados de microdureza.

5 CONCLUSÕES

Os estudos conduzidos levaram à resultados interessantes e de acordo com o objetivo da pesquisa, a qual visava definir os parâmetros mais importantes do processo para se obter deposições de boa qualidade e atender às demandas da indústria. Para ambas as composições, WC-17Co e WC-7Ni-19Cr, ficou estabelecido que configurações utilizando a combinação de uma velocidade de deposição de 500mm/min e uma potência de 250W produzem camadas de boa qualidade, com pouca ou nenhuma presença de poros e trincas ou destacamento do material depositado. Também, resulta em uma menor ZTA, importante fator a ser analisado pois em um processo de construção camada por camada, uma ZTA muito grande pode afetar microestruturas e propriedades de camadas já depositadas e conseqüentemente apresentar distorções geométricas e/ou tensões residuais.

Ao se utilizar aços ferramentas (AISI 4140 e AISI H13) como substrato, a intenção da deposição é aumentar as propriedades interessantes para aplicações desses materiais como por exemplo, dureza e resistência ao desgaste, ambas muito importantes para moldes e ferramentais. Como resultado, a deposição de ambas as composições, resultou em um aumento da dureza e da resistência ao desgaste.

6 ESTUDOS FUTUROS

O trabalho descrito ainda necessita de estudos adicionais, como por exemplo, análises por meio da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), ensaios de desgaste microadesivo e ensaios de corrosão.

Para melhorar a qualidade das amostras produzidas, pode ser avaliado o uso de um tratamento térmico de têmpera posterior à deposição para normalizar as propriedades do substrato afetadas pela ZTA, como foi constatado e discutido anteriormente.

Para as aplicações que necessite mais de uma camada de deposição, também deve ser avaliado as influências dos parâmetros e a qualidade da geometria final produzida, atentando-se à diferentes propriedades.

7 REFERÊNCIAS

ASTM E384-17, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. ASTM International F2792-12a, 2012.

ATTARAN, M. **The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing.** Business Horizons, v. 60, n. 5, p. 677-688, 2017.

ATTARAN, M. **Additive manufacturing: the most promising technology to alter the supply chain and logistics.** Journal of Service Science and Management 10.03 (2017): 189.

BACKMAN, A. - “Redefinindo o projeto com a manufatura aditiva” – Sandvick Inovação, Suécia, 24/05/2018 Disponível em :<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/mww/pages/inn_amcenter.aspx>. Acesso em 22/09/2020

BAX, B.; et al. - **Systematic evaluation of process parameter maps for laser cladding and directed energy deposition.** Additive Manufacturing 21, pp. 487-494, 2018.

DOS SANTOS TORRES, C.; SCHAEFFER, L. **Sinterização do composto metal duro WC-Co.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 4, n. 3, p. 58-63, 2009.

ESTEVES, P. J. et al.; **Effect of ball rotation speed on wear coefficient and particle behavior in micro-abrasive wear tests.** Wear, v. 426, p. 137-141, 2019.

FRAZIER, W. E. **Metal additive manufacturing: a review.** Journal of Materials Engineering and performance, v. 23, n. 6, p. 1917-1928, 2014.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct Digital manufacturing.** Springer, 2009.

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.

LEWANDOWSKI, J. J.; SEIFI, M. **Metal additive manufacturing: a review of mechanical properties.** Annual review of materials research, v. 46, 2016.

LI, Z. et al. **Microhardness and wear resistance of Al₂O₃-TiB₂-TiC ceramic coatings on carbon steel fabricated by laser cladding.** Ceramics International, v. 45, n. 1, p. 115-121, 2019.

MARQUES, C. M. F. G.; BOBROVNITCHII, G. S.; HOLANDA, J. N. F. – “Análise de fases por difração de raios X de WC-10%Co dopado com terras-raras obtido sob alta pressão”. Matéria (Rio J.), v. 18, n. 1, p. 10-18, 2013.

MERGULHÃO, M. V. **Avaliação de propriedades mecânicas e caracterização microestrutural de consolidados de Cobalto-Cromo-Molibdênio obtidos por fusão seletiva a laser e fundição de precisão.** 2017. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, 2017.

NGO, T. D. et al.; **Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges.** Composites Part B: Engineering, v. 143, p. 172-196, 2018.

ORDOÑEZ, M. F. C. et al.; **Microstructure and micro-abrasive wear of sintered yttria-containing 316L stainless steel treated by plasma nitriding.** Surface and Coatings Technology, v. 374, p. 700-712, 2019.

RODRIGUES, V. P. et al. **Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações.** Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas, v. 12, n. 3, p. 1, 2017.

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

THOMAS, D. Costs, benefits, and adoption of additive manufacturing: a supply chain perspective. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 85, n. 5-8, p. 1857-1876, 2016.

VICARI, A.; KOZARSKY, R. **Building the future: assessing 3D printing's opportunities and challenges.** Lux Research Inc.: Boston, MA, USA, 2013.

VILAR, R. **Laser cladding.** Journal of laser applications, v. 11, n. 2, p. 64-79, 1999.

VITHANI, K. et al. **An overview of 3D printing technologies for soft materials and potential opportunities for lipid-based drug delivery systems.** Pharmaceutical Research, v. 36, n. 1, p. 4, 2019.