

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

CARLOS GABRIEL GONÇALVES DE MOURA

Boretação dos aços AISI H13 e AISI 316L produzidos por meio de
Manufatura Aditiva (MA) utilizando o processo *Laser Powder - Directed*
Energy
Deposition (LP-DED)

São Carlos

2021

CARLOS GABRIEL GONÇALVES DE MOURA

Boretação dos aços AISI H13 e AISI 316L produzidos 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

VERSÃO CORRIGIDA

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).

Mb Moura, Carlos Gabriel Gonçalves de
 Boretação dos aços AISI H13 e AISI 316L
 produzidos por meio de Manufatura Aditiva (MA)
 utilizando o processo Laser Powder - Directed Energy
 Deposition (LP-DED) / Carlos Gabriel Gonçalves de
 Moura; 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. Deposição de H13. 4. Deposição de 316L. 5.
 Impressão 3D de metais. 6. Boretação. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE APROVAÇÃO

| |
|---|
| Candidato / Student: Carlos Gabriel Gonçalves de Moura |
| Título do TCC / Title: Boretação dos aços AISI H13 e AISI 316L produzidos por meio de Manufatura Aditiva (MA) utilizando o processo Laser Powder - Directed Energy Deposition (LP-DED) |
| Data de defesa / Date: 03/12/2021 |

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

Presidente da Banca / Chair of the Examining Committee


Professor Doutor Fábio Edson Mariani

DEDICATÓRIA

A minha família, namorada, 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 e ao Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade LAPRAS, pelo apoio incessável e infraestrutura de excelência oferecida durante o curso.

Ao Prof. Dr. Fábio Edson Mariani e demais integrantes do LAPRAS (Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade) que me apoiaram e contribuíram no desenvolvimento desse projeto.

À minha namorada, Letícia Aledi, que sempre esteve presente em meu dia-a-dia e me motiva e apoia a minha carreira.

A minha família, Valéria, Arnaldo e Gabriela, pelo suporte e apoio constante durante minha jornada universitária.

Aos meus amigos, em especial a República 4 de Paus de Lorena (EEL USP), por todas as aventuras juntos e as experiências que ficarão marcadas para sempre de um período inesquecível.

RESUMO

MOURA, C.G.G. **Título:** Boretação em Aços H13 e 316L produzidos por meio de Manufatura Aditiva (MA) utilizando o processo *Laser Powder - Directed Energy*. 2021 45 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

Com o advento da chamada quarta revolução industrial, a manufatura aditiva (MA) transformou o modo em que as peças são fabricadas. Adicionalmente, o uso de técnicas de recobrimento pode complementar a MA, pois auxiliam na obtenção superfícies com propriedades específicas, tais como: elevada dureza superficial, resistências ao desgaste e/ou à corrosão, em conjunto com uma boa tenacidade proveniente do substrato, contribuindo para a aumentar a vida útil e o desempenho de peças. Entre as técnicas de recobrimento, o tratamento termoquímico de boretação líquida se destaca pois permite produzir camadas de elevadas durezas com resistência ao desgaste, além de possibilitar a realização da têmpera diretamente a partir da temperatura do tratamento. O objetivo desse trabalho consistiu na caracterização de camadas boretadas produzidas nos aços AISI H13 e AISI 316L obtidos por meio de LP-DED, avaliando-se as características microestruturais e tribológicas. As amostras foram submetidas a tratamentos de boretação seguido de resfriamento ao ar ou têmpera direta e revenimento. Foram realizadas análises microestruturais por meio de microscopia confocal a laser, ensaios de microdureza Vickers e o ensaios de desgaste microadesivo. Foram obtidos revestimentos homogêneos de elevadas durezas e resistentes ao desgaste, quando comparados aos substratos.

Palavras-chave: 1. *Manufatura aditiva* 2. *Directed Energy Deposition* 3. *Impressão 3D de metais* 4. *AISI H13* 5. *AISI 316L*

ABSTRACT

MOURA, C.G.G. **Title:** Boring in H13 and 316L Steels produced through Additive Manufacturing (MA) using the Laser Powder - Directed Energy process. 2021. 45f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

With the advent of the so-called fourth industrial revolution, additive manufacturing (AM) transformed the way parts are manufactured. Additionally, the use of coating techniques can complement AM, as they help to obtain surfaces with specific properties, such as: high surface hardness, wear and/or corrosion resistance, together with good tenacity from the substrate, contributing to to increase the life and performance of parts. Among the coating techniques, the thermochemical treatment of liquid boration stands out because it allows the production of layers of high hardness with resistance to wear, in addition to enabling the realization of quenching directly from the treatment temperature. The objective of this work consisted in the characterization of bored layers produced in AISI H13 and AISI 316L steels obtained by means of LP-DED, evaluating the microstructural and tribological characteristics. The samples were subjected to boreating treatments followed by air cooling or direct quenching and tempering. Microstructural analyzes were performed using confocal laser microscopy, Vickers microhardness tests and microadhesive wear tests. Homogeneous coatings of high hardness and wear resistant were obtained when compared to substrates.

Keywords: 1. *Additive Manufacturing* 2. *Directed Energy Deposition* 3. *3D printed* 4. *AISI H13* 5. *AISI 316L*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Desenho esquemático do bocal utilizado no processo LP-DED..... | 16 |
| Figura 2 - Secções transversais: (a) camada borexada do tipo “dente de serra” produzida em um aço com teor de carbono a 0,3%p e de fósforo a 0,02%. (b) Camada borexada com morfologia mais uniforme produzida em um aço AISI P20..... | 21 |
| Figura 3 - Fluxograma dos procedimentos realizados e etapas | 24 |
| Figura 4 -Substrato de AISI H13 usinado para realização da deposição..... | 25 |
| Figura 5 - Máquina de manufatura híbrida utilizada para realizar as deposições..... | 26 |
| Figura 6 - Desenho esquemático de como ficaram as amostras depositadas..... | 27 |
| Figura 7 - Forno do tipo “poço” e controlador de temperatura utilizados para a realização do tratamento de borexada..... | 28 |
| Figura 8 - Equipamento utilizado para a realização dos ensaios de desgastes microadesivos. | 30 |
| Figura 9 - Micrografias dos substratos (a) AISI H13 e (b) AISI 316L..... | 31 |
| Figura 10 - Micrografia óptica da secção transversal do AISI H13 produzido por meio do processo de MA LP-DED, na condição como construído..... | 32 |
| Figura 11 - Micrografias ópticas dos aços (a) AISI H13 e (b) AISI 316L, obtidos por meio do processo LP-DED, após o tratamento de borexada. | 32 |
| Figura 12 - AISI H13 borexados a 1000 °C por 6 horas, seguido de têmpera e revenimento. (a) Aços obtidos por meio de processos convencionais ou (b) LP-DED. | 33 |
| Figura 13 - AISI 316L borexados a 1000 °C por 6 horas. (a) Aços obtidos por meio de processos convencionais ou (b) LP-DED..... | 34 |
| Figura 14 - Perfis de microdureza Vickers obtidos para as camadas borexadas..... | 35 |
| Figura 15 - Gráficos de desgaste | 37 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 13 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 2.1. Manufatura Aditiva..... | 15 |
| 2.2. Ligas metálicas AISI H13 e AISI 316L..... | 18 |
| 2.3. Boretação | 19 |
| 2.4. Desgaste | 22 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 24 |
| 3.1. Deposição das amostras | 24 |
| 3.3. Tratamento termoquímico de boretação líquida..... | 27 |
| 3.4. Análise microestrutural | 28 |
| 3.5. Ensaio de microdureza Vickers..... | 29 |
| 3.6. Ensaio de desgaste microadesivo..... | 29 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 31 |
| CONCLUSÕES..... | 38 |
| ESTUDOS FUTUROS..... | 39 |
| REFERÊNCIAS..... | 40 |

1. INTRODUÇÃO

As primeiras revoluções industriais nos trouxeram os processos de fabricação mais importantes e tradicionais, como o forjamento, fundição, soldagem e a usinagem, isto beneficiou a humanidade ao longo dos anos, pois a partir do artesanato, uma peça poderia estar pronta e nas mãos dos consumidores apenas dias ou meses após a produção. Com o advento da chamada quarta revolução industrial, a manufatura aditiva (MA) transformou o modo em que as peças são fabricadas (DIAS,2020).

A MA está atrelada nestes conceitos, pois o processo facilita a construção de objetos tridimensionais com quaisquer geometrias e permitindo uma gama muito grande de tipos de materiais, desde material polimérico até metálico. Em tempos de indústria 4.0, o desenvolvimento de novas formas de manufatura e otimização de novos materiais tende a aumentar a produtividade e a qualidade dos produtos (DIAS, 2020).

Esta tecnologia já está presente em várias áreas de aplicação, como a indústria aeronáutica, automobilístico, saúde e educação. Na indústria aeronáutica, empresas como a Airbus já estão produzindo peças metálicas impressas em 3D para seus aviões, pois já observaram a facilidade de produção e ótimas propriedades mecânicas. Na área do automobilismo, empresa como a Local Motors já confeccionam peças de alta qualidade e com efetividade acima da média, o exemplo é o automóvel, chamado Strati, inteiro de peças 3D e produzido em apenas 44 horas. A MA também está presente na área da saúde, pois próteses de baixo custo já está sendo produzidas via impressão 3D, mas já existem indícios que membros biônicos que já estão sendo estudados, assim como órgãos humanos (DYER, 2015).

Porém, como qualquer nova tecnologia, o estágio da manufatura aditiva está em desenvolvimento, pois apresenta muitos entraves que necessitam ser superadas por novas pesquisas da academia e aplicações na indústria, tornando esta manufatura viável no futuro (ALMEIDA, 2021).

Os tratamentos superficiais podem complementar a MA, pois auxiliam na obtenção de propriedades específicas, como elevar dureza superficial em conjunto com uma boa tenacidade da peça como um todo, contribuindo para a aumentar a vida útil e o desempenho de peças (SANTOS, 2018).

Dentre os tratamentos superficiais utilizados, como a nitretação, carbonitretação, aspersão térmica, deposição química de vapor (CVD), a deposição física de vapor (PVD), tratamentos termorreativos de deposição e difusão (TRD), escolheu-se trabalhar neste estudo,

a boretção por ser um tratamento simples, de baixo custo e que produz camadas de elevadas durezas e resistência ao desgaste (OLIVERA, 2006).

O objetivo desse trabalho consistiu na caracterização de camadas boretadas produzidas nos aços AISI H13 e AISI 316L obtidos por meio de LP-DED, avaliando-se as características microestruturais e tribológicas. Para atingir o objetivo, a pesquisa foi realizada em cinco partes: 1. Deposição da amostra; 2. Tratamento termoquímico de boretção ou boretção seguido de têmpera e revenimento; 3. Análise microestrutural (microscopia óptica); 4. Ensaio de microdureza Vickers; 5. Ensaio de desgaste microadesivo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Manufatura Aditiva

Manufatura Aditiva (MA) é o termo técnico para descrever os equipamentos e processos capazes de produzir objetos, protótipos ou produtos acabados por meio de adição de material, camada por camada, a partir de modelo tridimensional digital obtido por meio de projeto assistido por computador (CAD/CAM) (ABNT 2018). Esse processo de manufatura vem sendo estudado e utilizado há mais de três décadas e permite produzir objetos de todos os tipos de materiais, incluindo também sistemas biológicos (FRAZIER, 2014).

Após a criação da tecnologia de desenho em 3D (*Computer-Aided Design* - CAD), a MA começou a ser ampliada e revolucionou o desenvolvimento de produtos e o processo de fabricação, impulsionando a indústria 4.0. O processo de MA é referida como uma tecnologia disruptiva, pois está alterando a forma como projeto é realizado e possibilitando novos negócios (GIBSON, 2015).

Entre as vantagens desse processo destacam-se: a rapidez, não em relação ao tempo de criação das peças, mas uma vez que o desenho CAD 3D está sendo usado como o ponto de partida, a transferência da informação para a máquina de MA é relativamente contínua e existe menos preocupação com a conversão de dados ou interpretação da intenção do projeto; uniformidade do processo, pois como é realizado em apenas uma etapa, reduz tempo de processamento; bem como a redução de recursos, por possibilitar a criação de componentes com geometrias complexas, otimizando recursos e podendo utilizar apenas a própria máquina de MA para produção da peça, dispensando outros processos de fabricação (GIBSON, 2015).

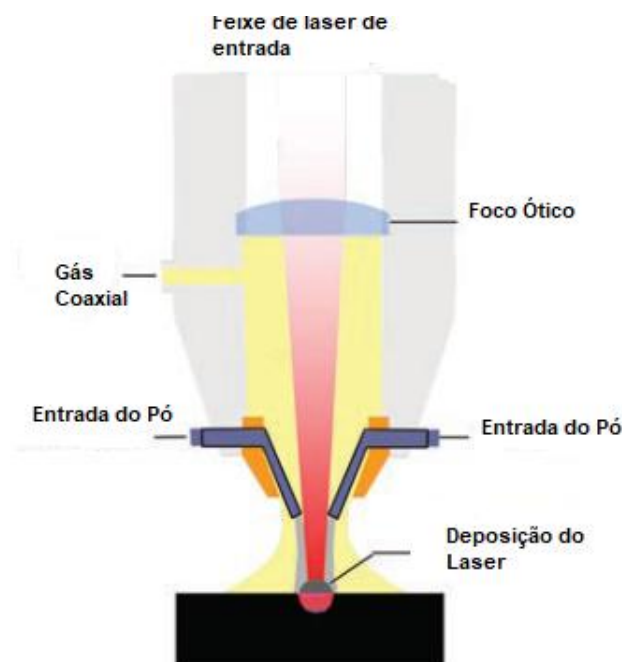
Thomas-seale *et al* (2018) realizou um estudo no Reino Unido, identificando problemas na manufatura aditiva relacionada a produção final. Os autores identificaram dezoito barreiras, como por exemplo: repetibilidade, software, acabamento, tolerância e resistência mecânica, evidenciando a necessidade de maiores estudos nesta área.

Atualmente são sete os processos de MA reconhecidos, sendo eles: Jato de aglutinante (*binder jetting*); Deposição por energia direcionada (*directed energy deposition* - DED); Extrusão de material (*material extrusion*); Jateamento de material (*material jetting*); Fusão em leito de pó (*powder-bed fusion* - PBF); Laminação de folha (*sheet lamination*); e Fotopolimerização em cuba (*vat photopolymerization*) (ABNT 2018).

A norma ASTM F2792-12a classifica as tecnologias de MA utilizadas para a fabricação de componentes metálicos em quatro grupos principais: PBF, DED, binder jetting e sheet lamination. As formas mais comuns do material de insumo são o pó metálico, o arame metálico e folhas de metal.

DED é um dos principais processos usados na fabricação aditiva de materiais metálicos. Em DED, uma fonte de calor (laser, feixe de elétrons ou arco elétrico) 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 restauração dimensional e muitas camadas subsequentes podem ser usadas para construir formas tridimensionais. No entanto, os componentes produzidos por meio do processo DED são considerados como possuindo formas quase definitivas, ou seja, próxima da forma final (*near net shape*), pois a usinagem pós-processo quase sempre é usada para atingir dimensões geométricas e tolerâncias exigidas para componentes de engenharia (MARTUKANITZ, 2020). Apresenta-se na Figura 1 o desenho esquemático do bocal utilizado no processo LP-DED (Laser Powder - Directed Energy Deposition).

Figura 1 - Desenho esquemático do bocal utilizado no processo LP-DED



Fonte: (MARTUKANITZ, 2020)

O processo DED por ser utilizado para construção de peças a partir de um substrato ou para recuperação de peças danificadas (FRAZIER, 2014) (SHIM et al, 2016). Outra aplicação do processo é para deposição de camadas com propriedades superiores ao substrato, visando um melhoramento das resistências ao desgaste e/ou à corrosão (MARIANI, 2021).

Outros pesquisadores estudaram diferentes deposições metálicas utilizando o processo DED. Entre as pesquisas, destacam-se a de Yan *et al* (2019), que estudaram as deposições de pós metálicos dos aços AISI H13, AISI 316L, P20 e 18Ni300, obtidos por meio de atomização a gás. Os autores observaram que foram produzidas camadas depositadas com fases austeníticas ou martensíticas nas microestruturas dos aços. Também foram observadas finas camadas de oxidação nas superfícies, principalmente os Fe_2O_3 , MnO e Cr_2O_3 , e que estes óxidos não impediram a irradiação do laser na matriz metálica durante as deposições.

Shalnova *et al* (2022), estudou amostras de Ti-6Al-4V fabricadas pela técnica DED com uma mistura de pós não utilizados e reciclados em percentagens de pó reciclado de 0%, 10%, 25% e 50%. Os resultados mostram que a morfologia do pó não muda significativamente devido ao baixo número de utilizações de pó. A análise química revela uma ligeira diminuição de V no pó reciclado. A evolução da macroestrutura com o aumento do conteúdo de pó reciclado não foi revelada.

Javidani *et al* (2016), estudou a deposição da liga AlSi10Mg pelo processo de DED. Os autores notaram uma estrutura impressa altamente consolidada e sem defeitos, encontrando na microestrutura camadas colunares dendríticas dominantes e próximo ao substrato foi observado grãos equiaxiais.

Kakinuma *et al* (2016), investigou as deposições de pós metálicos da superliga de níquel, Inconel 625, obtido por meio de atomização a gás e a influência da caracterização do pó durante o processo de DED. Os autores utilizaram diferentes distribuições de tamanho de partícula, variando de 45 – 250 μm). Os autores conseguiram realizar as deposições, porém dependendo da potência do laser, do tamanho do pó e da densidade de vazios, pode provocar incidência de trincas. Os autores notaram a formação de uma camada de carbono e de óxido de cromo na superfície. Outra observação foi que os gases utilizados no processo (argônio, metano) podem ficar presos nos vazios do Inconel 625.

2.2. Ligas metálicas AISI H13 e AISI 316L

O AISI H13 é um aço ferramenta de trabalhado a quente com teor de carbono entre 0,32 e 0,45% em peso. Sua microestrutura, dependendo de como o material é tratado termicamente, pode possuir as fases: austenita, martensita, bainita, ferrita e carbonetos (ASTM, 2015) (CHEN et al, 2017). Este aço é utilizado para produções de moldes de precisão para fabricação de ferramentas (LEE et al, 2009) ou para moldes utilizados em processos de fundição sob pressão de ligas de cobre ou alumínio (YAN et al, 2019). Quando temperado e revenido, o aço AISI H13 apresenta alta resistência ao choque térmico, fadiga térmica, resistência à abrasão e ao calor (LEE et al, 2009).

A composição química em nominal do aço AISI H13 é: 0,4% de C; 1,0% de Si; 0,35% de Mn; 5,0% de Cr; 1,5% de Mo; 1,0% de V e Fe balanço. Cada elemento possui sua propriedade e a composição é definida pela norma AISI H13. O Si ajuda a elevar o limite de escoamento, Mn é utilizado como desoxidante durante o processo de elaboração do aço no forno elétrico, diminuindo o potencial do oxigênio e assim promovendo a retirada do enxofre do aço através de uma escória própria de alta basicidade. O Cr eleva a temperabilidade e a resistência a oxidação. O Mo melhora bastante a retenção de dureza em maiores temperaturas e evita a fragilização quando o aço é submetido a longo tempo de exposição em temperaturas elevadas. O V desempenha o papel para auxiliar no refino de grão e diminui a temperatura de transição entre fratura dúctil e frágil (LEANDRO, 2004).

Algumas propriedades do aço AISI H13 são listadas abaixo (STEEL HANDBOOK, 1993):

- Possui uma grande temperabilidade;
- Grande resistência ao amolecimento pelo calor;
- Boa resistência ao desgaste em temperaturas elevadas;
- Excelente tenacidade;
- Boa usinabilidade em comparação com outros aços ferramentas;
- Excelente resistência à choques térmicos devidos à aquecimentos e resfriamentos contínuos.

Os aços inoxidáveis têm boa resistência à corrosão devido à formação de filme de óxido de cromo firmemente coerente, aderente, isolante e renovável na superfície na ordem de apenas algumas camadas de átomos em espessura (Ozdemir et al, 2009). Aços inoxidáveis austeníticos,

como o nome indica, têm uma microestrutura austenítica (CFC – Cúbica de Face Centrada) à temperatura ambiente e não podem ser endurecidos por meio de tratamentos térmicos, embora possam ser consideravelmente fortalecidos por trabalho a frio. O AISI 316L é um membro do grupo de aços inoxidáveis austeníticos que foi desenvolvido há mais de 30 anos para ser aplicado em reatores do tipo super-regeneradores (do inglês: *fast breeder reactor*) para a União Européia. Esta classe de aço possui boa soldabilidade e usinabilidade, combinada com alta resistência à corrosão, portanto usado em uma ampla gama de aplicações. Na indústria nuclear, é utilizado como material estrutural para as câmaras de vácuo de sistemas term nucleares (ZHONG et al, 2017). A utilização desta liga de aço inoxidável produzido via processos convencionais de fundição, se dá em diversas áreas da indústria, como por exemplo no segmento biomédico, como implantes metálicos em conjunto com outras ligas de Cobalto-Cromo ou Titânio (Co-Cr ou Ti) (Galliano *et al*, 1998) (Ozbek et al, 2002). Essa liga é amplamente utilizada em meios altamente corrosivos e de altas temperaturas, porém possui baixa dureza (aproximadamente 200 HV) quando comparada a aços carbono temperados e revenidos (600 HV) (KULKA, 2016).

Os aços AISI H13 e AISI 316L podem ser submetidos a tratamentos superficiais para aumentar suas resistências ao desgaste e/ou à corrosão e expandir sua faixa de usabilidade. Entre os tratamentos, destaca-se o termoquímico de boretação.

2.3. Boretação

A deposição física de revestimentos é normalmente usada para melhorar as resistências ao desgaste e à corrosão dos metais. Existem numerosos métodos para produção de revestimentos, por exemplo: galvanização com ou sem eletrodo, aspersão térmica, deposição física de vapor (PVD) ou deposição química de vapor (CVD). Estes métodos fornecem proteção aos metais contra ambientes agressivos, porém alguns destes métodos são caros e oferecem uma dureza superficial de até 900 HV. Já os tratamentos termoquímicos são realizados nas superfícies de componentes com o objetivo de modificar a estrutura em relação ao interior da peça, realizando um aquecimento na peça ou substrato em uma atmosfera rica nos elementos a que se deseja que ocorra a difusão, tais como: carbono, nitrogênio, boro, etc. Entre os tratamentos termoquímicos destaca-se a boretação, por produzir camadas com durezas de até 2100 HV, mantendo-se esses altos valores até a temperatura de 600 °C (KAYALI, 2013) (CULHA et al, 2007).

A Boretação é um importante tratamento de engenharia de superfícies para elevar a dureza da superfície e a resistência à abrasão do metal. O boro é um elemento de tamanho relativamente pequeno, e isso permite que ele se difunda em uma variedade de metais, permitindo a inserção deste átomo nos interstícios do material metálico (POLLNOW, OSÓRIO, 2017).

A ligação covalente da maioria dos boretos é considerada bem forte, responsável por elevar propriedades físicas, como o ponto de fusão, módulo de elasticidade e a dureza (SEN *et al*, 2001). As camadas boretadas variam em sua espessura de 21 a 380µm, essa dimensão pode-se depender da característica do tratamento, tempo, temperatura e presença de elementos de liga no substrato (Özbek *et al*, 2002).

Os revestimentos realizados com boretos podem ser produzidos por procedimentos líquidos, gasosos ou sólidos. Para aplicações industriais, boretação em estado sólido é mais desejável do que os outros dois métodos devido à sua facilidade de tratamento, simplicidade do equipamento e relação custo-benefício (ESPINOZA *et al*, 2016).

Na boretação líquida utiliza-se de um banho de sal contendo uma fonte boretante (por exemplo, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, KBF_4 ou $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7$) e um agente redutor (B_4C , SiC , Fe-Al ou Al). A reação termoquímica faz com que a mistura boretante libere o boro elementar, que difundirá para o interior do substrato, e então os átomos de boro reagem com o metal base, formando boretos (FeB e Fe_2B) (MATIASOVSKÝ *et al*, 1988). A maioria dos tratamentos baseia-se na redução de bórax fundido ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), a temperaturas entre 900 e 1000°C. O Alumínio auxilia na reação, pois ele catalisa a redução o boro do Boráx, levando na formação da camada de boretos (MARIANI, 2014).

Em relação a cinética do processo, Sen e Bindal (2004), utilizaram modelos matemáticos que podem prever a espessura da camada boretada em relação ao tempo de boretação, estes modelos são uma função parabólica (Equação 1) e a partir de um determinado tempo de exposição, o modelo se molda para uma reta (Equação 2). Estas funções podem ser vistas como um estágio de inserção do átomo de boro até a formação do boreto. Onde: x é a espessura da camada, t é o tempo de tratamento, b é uma constante, K é o coeficiente de difusão e K' é o coeficiente angular da reta.

$$x^2 = t \cdot K$$

Equação 1

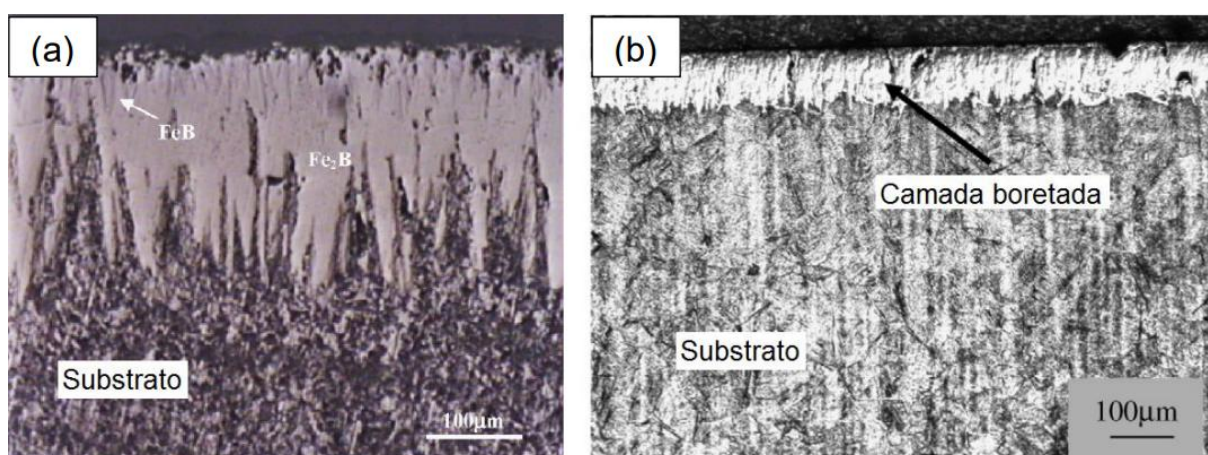
$$x = K' \cdot t + b$$

Equação 2

Em suma, quanto mais elevada for a temperatura de boretação e/ou maior for o tempo de tratamento, maior será a espessura da camada boretada (SEN, SEN, BINDAL, 2004).

Para aços, a boretação é realizada a altas temperaturas (850-1100 °C) com tempos de tratamentos variando de 30 minutos a 12 horas, produzindo camadas de boretos monofásicos (FeB) e/ou polifásicos (Fe₂B). A fase FeB é obtida mais externamente a superfície com a saturação do boro e a fase Fe₂B na zona da superfície interna. Devido aos seus altos valores de dureza, as camadas boretadas apresentam altas resistências sob fricção e ao desgaste (Kariofillis, Kiourtsidis e Tsipas, 2005). Apresenta-se na Figura 2 micrografias ópticas das secções transversais de duas ligas ferrosas boretadas.

Figura 2 - Secções transversais: (a) camada boretada do tipo “dente de serra” produzida em um aço com teor de carbono a 0,3%p e de fósforo a 0,02%. (b) Camada boretada com morfologia mais uniforme produzida em um aço AISI P20.



Fonte: (a) BINDAL, C.; UCISIK, A.H. (2008). (b) USLU, I. et al. (2007).

O aço AISI H13 é utilizado em moldes de fundição sob pressão e também em matrizes de forjamento, portanto se faz necessário o uso do processo de boretação para que estas peças sejam submetidas a tensões mecânicas induzidas pelo fluxo à alta pressão do metal líquido e a tensões térmicas decorrentes do contato alternado com o material fundido, em temperaturas acima de 700 °C. Estas tensões aceleram o desgaste, assim como trincas superficiais nas áreas de maiores pressões, desqualificando a ferramenta e comprometendo a matriz, tornando a substituição necessária (OLIVEIRA, 2006).

Na indústria, a boretação do aço 316L já é utilizada em certas áreas, como no setor têxtil e de borracha, pois são áreas em que a alta dureza e resistência ao desgaste de materiais boretados são adequados para a aplicação. Wang et al (2012) cita alguns exemplos de uso, como

em anéis de aço para máquinas de fiar e cabos de aço de guia para indústria têxtil, além de ser usado em suspensão de carro ferroviário. Özbek *et al* (2002) estudou a produção de camadas boretadas no AISI 316L como uma via para minimizar problemas de corrosão em implantes médicos.

Domínguez-Galicia *et al* (2014), estudaram a avaliação de influência do boro nas propriedades mecânicas da liga AISI 316L com camadas boretadas em via sólida por difusão do agente boridizante contendo 5% de B₄C. Foram avaliadas a dureza, o módulo de Young e a presença de fases de boretos de ferro (FeB e Fe₂B) a partir de análises com difração de raios-x (DRX). Os autores concluíram que a dureza da fase FeB foi constante em uma faixa de 2085 a 2157 HV, enquanto a dureza da fase Fe₂B aumentou na faixa de 1650 a 1850 HV e a influência do potencial de boro no boreto foi proporcional a espessura da fase FeB.

2.4. Desgaste

Desgaste pode ser definido como uma perda progressiva de material da superfície de um corpo pela ação mecânica de agentes externos que estejam em contato com o mesmo. Ele consiste numa das principais causas de falhas e perdas de componentes mecânicos ou estruturais no mundo. A redução de desgaste em componentes apresenta grande interesse econômico para a maioria das indústrias. O maior desafio de resolver um problema envolvendo desgaste consiste em antecipar o(s) tipo(s) de desgaste(s) a que os componentes serão submetidos (STACHOWIAK, 2013).

Krelling *et al* (2017), investigaram o comportamento abrasivo em microescala no aço AISI 1020. Os autores realizaram testes a partir de hastes cilíndricas de uma polegada de diâmetro e boretadas em via sólida, e então os tipos e a morfologia de boretos foi analisado por meio de difração de raios-X (DRX) e por microscopia eletrônica de varredura (MEV), além de ensaios de microdureza e de rugosidade. O estudo concluiu que após o tratamento de boretação, a rugosidade (Ra) aumentou de 0,02 µm para 1 µm. Ocorreu boa adesão da camada de boretos ao substrato do aço, mas a camada de FeB fraturou durante os experimentos, devido a esta camada ser mais quebradiça e ter uma dureza semelhante ao abrasivo utilizado, outra observação interessante é que o mecanismo de desgaste atuante durante o ensaio foi a abrasão por rolamento.

Oliveira (2006) investigou a resistência ao desgaste em microescala do AISI H13 e do aço AISI D2 boretado sob carga elevada e sem uso de abrasivo, após a realização do ensaio notou-se o aumento da resistência ao desgaste em comparação com o substrato e foi observado

um desgaste do tipo adesivo-abrasivo, verificado na aparência das calotas de desgaste, com o registro de sulcos paralelos e regiões polidas. Outro autor que estudou o mesmo mecanismo no AISI H13 foi Heck (2010), sua pesquisa concluiu que em suas amostras boretadas, o volume desgastado foi em média 96% menor do que os volume dos substratos. Estas amostras foram boretadas à 1000 °C e tiveram o mesmo comportamento adesivo, em relação ao desgaste, pois houve a formação de micropartículas de alta dureza advindas de pedaços arrancados nas camadas.

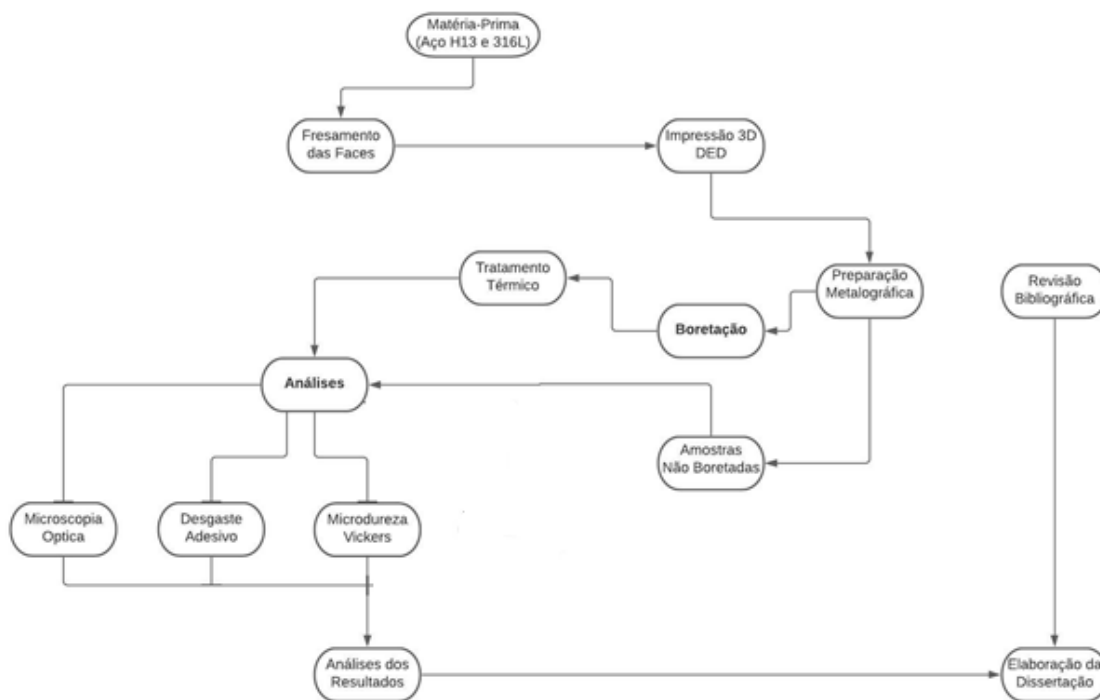
Alguns pesquisadores investigaram as propriedades de camadas de boreto produzidas em aço AISI 316L, entre eles, Leon et al (2020), estudou a produção de camadas por meio de boretação via sólida realizando ensaios de dureza Vickers, análises de DRX e testes de desgaste por deslizamento a seco. Os valores de dureza obtidos nas camadas produzidas foram entre 1930 a 2140 HV (para FeB) e 1630 a 1835 HV (para Fe₂B), e de 460 HV para o substrato. Além disso, a liga AISI 316L boretada melhora a resistência ao desgaste em torno de 41 vezes em comparação com o material de referência.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo desse trabalho consistiu na caracterização de camadas boretadas produzidas nos aços AISI H13 e AISI 316L obtidos por meio de LP-DED, avaliando-se as características microestruturais e tribológicas. Para atingir o objetivo, a pesquisa foi realizada em cinco partes: 1. Deposição da amostra; 2. Tratamento termoquímico de boretação ou boretção seguido de têmpera e revenimento; 3. Análise microestrutural (microscopia óptica); 4. Ensaio de microdureza Vickers; 5. Ensaio de desgaste microadesivo.

Na Figura 3 apresenta-se o fluxograma dos procedimentos experimentais e etapas realizadas neste trabalho.

Figura 3 - Fluxograma dos procedimentos realizados e etapas



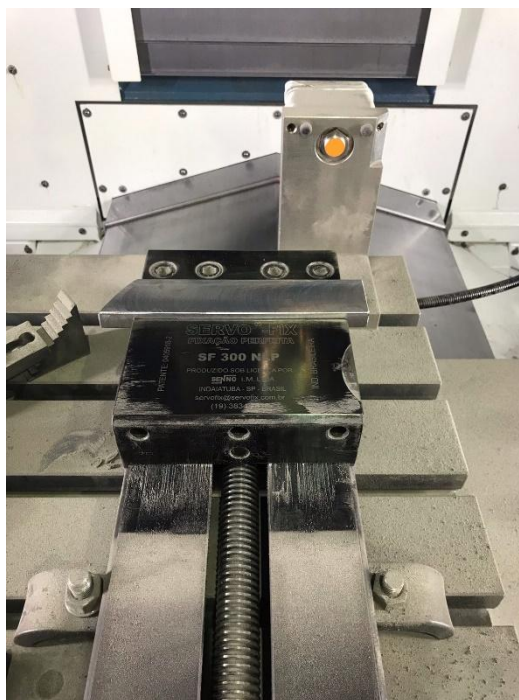
Fonte: Próprio autor.

3.1. Deposição das amostras

Foram utilizados pós de AISI H13 e AISI 316L produzidos pela LPW Technology Ltda., com granulometrias variando entre 45 e 106 µm. As amostras foram depositadas em substratos dos mesmos materiais nas dimensões de 100x50x25,4 mm, mostrado na Figura 4, obtido por meio de processos convencionais de fundição e forjamento. Para garantir que as deposições de

MA LP-DED fossem realizadas sem defeitos de construção ou inclusões de óxidos, os substratos foram submetidos a usinagem de fresamento das faces.

Figura 4 -Substrato de AISI H13 usinado para realização da deposição



Fonte: Próprio Autor

As composições químicas dos substratos são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Composições químicas dos substratos AISI H13 e AISI 316L (proporções em % peso)

| Elementos químicos | Cr | Mo | Mn | Si | V | C | Ni | Fe |
|--------------------|-------|------|------|------|------|------|-------|---------|
| AISI H13 | 5,18 | 1,36 | - | 1,04 | 0,83 | 0,36 | 0,21 | Balanço |
| AISI 316L | 17,10 | 2,33 | 1,32 | 0,85 | - | 0,02 | 13,21 | Balanço |

Fonte: Próprio autor.

Para deposição das amostras foi utilizada uma máquina de manufatura híbrida (manufaturas aditiva e subtrativa), fabricada pela Industrias Romi S.A., modelo D800 Hybrid (Figura 5). A máquina está instalada no Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade

(LAPRAS), do Núcleo de Manufatura Avançada (NUMA), pertencente ao Departamento de Engenharia de Produção (SEP) – EESC/USP.

Figura 5 - Máquina de manufatura híbrida utilizada para realizar as deposições

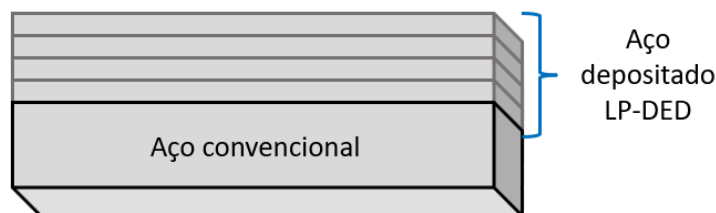


Fonte: Próprio autor.

Para a deposição do aço AISI H13 utilizou-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. Para a deposição do aço AISI 316L utilizou-se 900 W de potência do laser, com 400 mm/min de velocidade de avanço e taxa de alimentação do pó de 7,5 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. Foi utilizado 0,5 mm como incremento constante no eixo Z e 0,8 mm de *overlapping*. Os parâmetros de processo escolhidos foram selecionados com base em experimentos anteriores. Para cada aço, foram depositadas quatro camadas com dimensões de 100x30 mm, em um único sentido de trajetória. Apresenta-se na Figura 6 um desenho esquemático de como ficaram as deposições das amostras após a MA LP-DED.

Figura 6 - Desenho esquemático de como ficaram as amostras depositadas



Fonte: Próprio autor.

3.2. Preparação das amostras

O processo de preparação das amostras para o tratamento de boretação foi realizado no Laboratório de Análise Metalográfica, pertencente ao Departamento de Engenharia de Materiais (SMM) da EESC/USP. Para cada aço depositado foram preparadas quatro amostras, sendo divididas em: três para tratamentos termoquímicos de boretação e uma (como depositada) foi separada e utilizada como padrão para efeito comparativo. Todas as amostras foram seccionadas por meio de uma cortadeira metalográfica (*cut-off*) nas dimensões de 30x20 mm. As amostras foram lixadas em lixas d'água até a grana de 400 mesh e limpadas em banho ultrassônico com álcool etílico.

3.3. Tratamento termoquímico de boretação líquida

Os tratamentos superficiais e térmicos foram realizados no Laboratório de Tratamentos Térmicos, pertencente ao Departamento de Engenharia de Materiais (SMM) da EESC/USP. Para o tratamento de boretação foram utilizados bórax (borato de sódio P.A.: $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) e alumínio (10% em peso). O tratamento foi realizado em um forno do tipo “poço” com aquecimento por resistência elétrica. Um controlador de temperatura marca Flyever, modelo FE50RP calibrado com uma taxa de aquecimento de 20 °C/min e um termopar do tipo “K” (cromel/alumel) também foram usados no processo. O banho de boretação (bórax e alumínio) foi fundido em um recipiente na forma de copo, feito do aço AISI 316. Para homogeneização do banho, foi usada uma haste de aço carbono com constante agitação, para uma melhor dissolução dos aditivos. Na Figura 7 é apresentado o sistema utilizado na boretação.

Figura 7 - Forno do tipo “poço” e controlador de temperatura utilizados para a realização do tratamento de boretação



Fonte: Próprio autor.

O tratamento de boretação foi realizado a 1000 °C com tempo de permanência de 6 horas. As amostras foram introduzidas no banho sendo distribuídas e fixadas em distâncias semelhantes. Após o tempo de boretação, as amostras do aço AISI 316L foram retiradas e resfriadas ao ar, já as amostras do aço AISI H13 foram transferidas imediatamente para um recipiente com óleo para realização da têmpera. O objetivo desse procedimento é a produção de uma camada de boretos em um material temperado diretamente a partir da temperatura de boretação, sem a necessidade de reaquecimento posterior.

Após a têmpera, as amostras do aço AISI H13 foram submetidas ao tratamento de revenimento a 540 °C, com dois ciclos de permanência de 2 horas cada (duplo revenido). Esse procedimento é realizado para desestabilizar a austenita retida para transformação da martensita (primeiro revenimento) e revenir essa martensita obtida (segundo revenimento).

3.4. Análise microestrutural

A preparação metalográfica, realizada no Laboratório de Análise Metalográfica do SMM da EESC/USP, seguiu os procedimentos convencionais de corte com disco abrasivo de carboneto de silício em *cut-off*, embutimento a quente com baquelite, desbaste em lixas d'água até a grana de 1200 mesh e polimento com solução aquosa de alumina 0,05 µm. Após o

polimento as amostras foram limpadas em banho álcool etílico em equipamento ultrassônico. Os reagentes utilizados para o ataque químico foram: AISI H13 - Nital 2% (solução de 98% de álcool etílico e 2% de ácido nítrico); AISI 316L - Água Régia (mistura dos ácidos nítrico e clorídrico, proporção 1:3).

As análises microestruturais foram realizadas no Laboratório de Metalografia do Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade - LAPRAS (NUMA/SEP/EESC/USP). Para aquisição de imagens, foi utilizado microscópio confocal a laser, produzido pela Olympus Corporation, modelo OLS4000 com câmera integrada.

3.5. Ensaio de microdureza Vickers

As medidas de microdurezas foram realizadas no Laboratório de Engenharia de Superfícies do SMM da EESC/USP em um microdurômetro da marca Buehler, modelo 1600-6300. Para analisar as durezas médias dos substratos e deposições LP-DED, utilizou-se uma carga de 2,0 N (200 gf). Para analisar as durezas médias das camadas produzidas, bem como a obtenção dos perfis de durezas (camada e substrato), foi utilizada a carga de 0,1 N (10 gf), de modo a avaliar o comportamento dessa propriedade ao longo da seção transversal.

3.6. Ensaio de desgaste microadesivo

Para a avaliação da resistência ao desgaste das camadas produzidas e substratos, foi utilizado o ensaio de desgaste microadesivo com esfera fixa, do tipo “*calotest*”. O equipamento foi construído e instalado no Laboratório de Engenharia de Superfícies do SMM da EESC/USP, sendo mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Equipamento utilizado para a realização dos ensaios de desgastes microadesivos.



Fonte: Próprio autor.

Foram usadas esferas de aço AISI 52100 (temperado e revenido) com Ø 25.4 mm e 61 HRC de dureza, girando a 270 RPM e uma carga de 250 gf contra a amostra. Para obtenção das curvas de volumes removidos em função das distâncias percorridas, cada amostra foi ensaiada com tempos de 5, 10, 15 e 20 minutos (equivalentes a 54, 108, 162 e 215 metros de distâncias percorridas). Cada ensaio foi realizado em triplicata em cada amostra, para obtenção do volume removido médio e respectivo desvio padrão. O ensaio produz uma região desgastada em forma de calota, sendo seu diâmetro médio usado para a obtenção do volume desgastado segundo a Equação 3, onde, V : volume removido; d : diâmetro médio da calota formada e R : raio da esfera, 12,7 mm. Essa equação somente é válida quando a camada não é perfurada durante o ensaio.

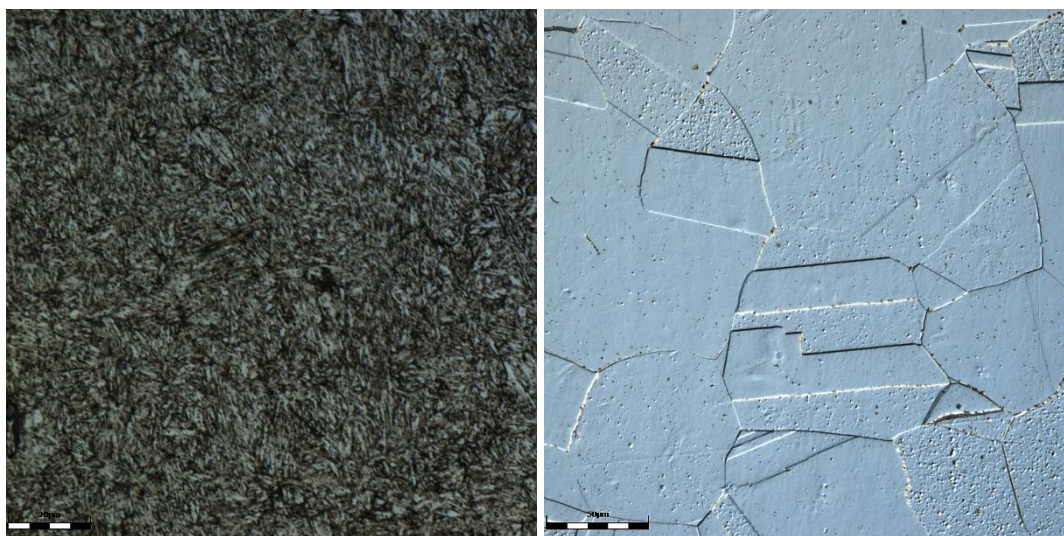
$$V = \frac{\pi d^4}{64R}; d \ll R$$

Equação 3

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresenta-se na Figura 9 as micrografias ópticas dos substratos AISI H13 (temperado e revenido a 540 °C) e AISI 316L, obtidos por meio de processos convencionais de fundição e forjamento.

Figura 9 - Micrografias dos substratos (a) AISI H13 e (b) AISI 316L

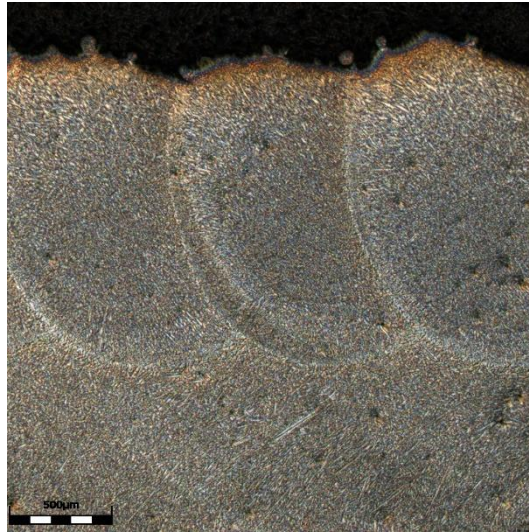


Fonte: Próprio autor.

Para o AISI H13 temperado e revenido, verifica-se que foi obtida microestrutura martensítica revenida, com dureza média de $553,5 \pm 14,2 \text{ HV}_{2,0}$. Para o AISI 316L, são observados grãos austeníticos, típicos de estrutura CFC (Cúbica de Face Centrada), com dureza média de $146,1 \pm 7,6 \text{ HV}_{2,0}$.

Apresenta-se na Figura 10 a micrografia óptica obtida para o aço AISI H13, produzido por meio de LP-DED, na condição como construído.

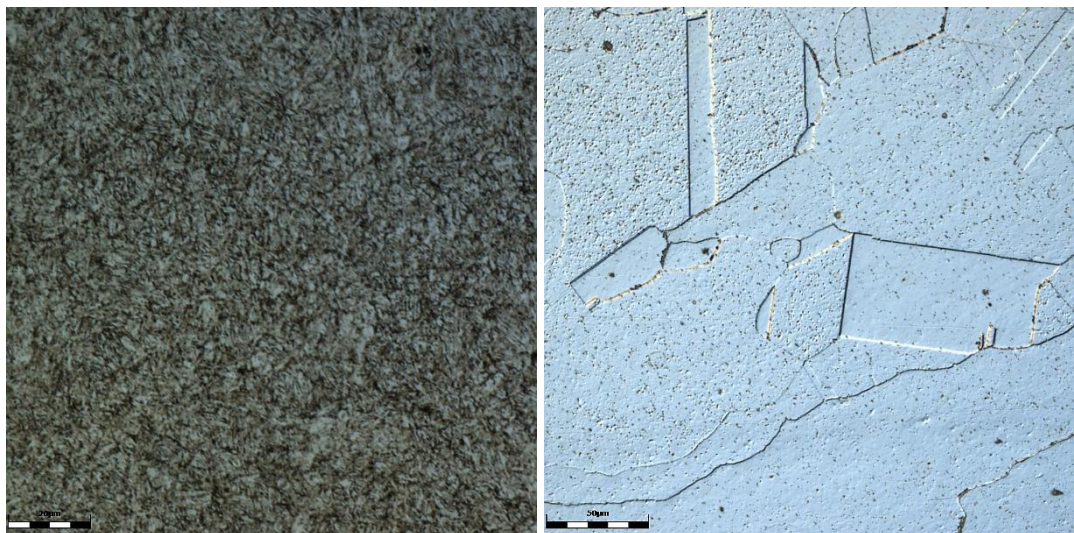
Figura 10 - Micrografia óptica da secção transversal do AISI H13 produzido por meio do processo de MA LP-DED, na condição como construído



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 11 são apresentadas as micrografias ópticas, obtidas após a boretação, dos aços AISI H13 (temperado e revenido) e AISI 316L depositados por meio de LP-DED.

Figura 11 - Micrografias ópticas dos aços (a) AISI H13 e (b) AISI 316L, obtidos por meio do processo LP-DED, após o tratamento de boretação.

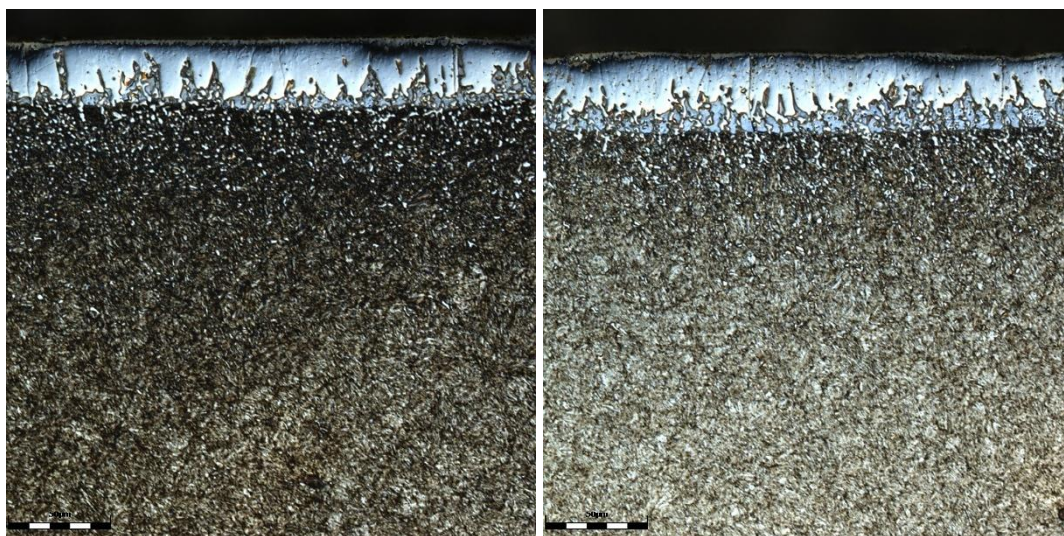


Fonte: Próprio autor.

Para o aço AISI H13, verifica-se que foi obtida microestrutura martensítica revenida, com dureza média de $561,3 \pm 17,9$ HV. No AISI 316L, foi obtida microestrutura de grãos austeníticos, com dureza média de $154,2 \pm 6,3$ HV.

Na Figura 12 são apresentadas as secções transversais das camadas produzidas nos aços AISI H13, obtidos por processos convencionais ou LP-DED.

Figura 12 - AISI H13 boretados a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 6 horas, seguido de têmpera e revenimento. (a) Aços obtidos por meio de processos convencionais ou (b) LP-DED.

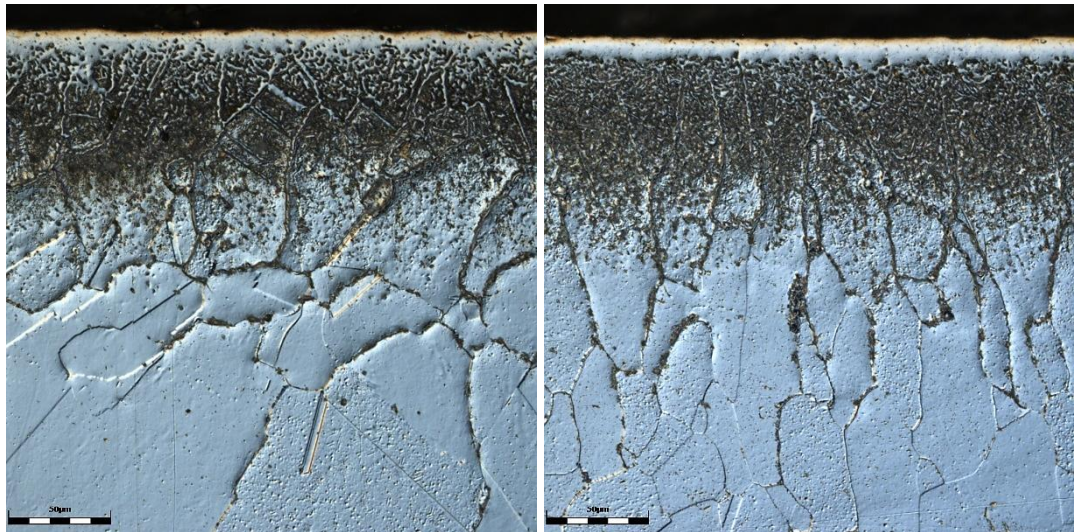


Fonte: Próprio autor.

Foram obtidas camadas boretadas com espessuras próximas a $50\text{ }\mu\text{m}$ e durezas médias de $1624,2 \pm 58,6$ HV_{0,1} e $1698,5 \pm 66,4$ HV_{0,1}, para os aços convencional e LP-DED, respectivamente.

São apresentadas na Figura 13 as micrografias ópticas das camadas produzidas nos aços AISI 316L, obtidos por processos convencionais ou LP-DED.

Figura 13 - AISI 316L boretados a 1000 °C por 6 horas. (a) Aços obtidos por meio de processos convencionais ou (b) LP-DED.



Fonte: Próprio autor.

Foram obtidas camadas boretadas com espessuras próximas a 10 μm e durezas médias de $1984,3 \pm 69,3 \text{ HV}_{0,1}$ e $1955,4 \pm 72,6 \text{ HV}_{0,1}$, para os aços convencional e LP-DED, respectivamente.

Tabela 2 – Dados de Dureza Vickers das Amostras

| Substrato/Convencional | | |
|------------------------|------------------|-------------------|
| | Sem Boretação | Com Boretação |
| H13 | $553,5 \pm 14,2$ | $1624,2 \pm 58,6$ |
| 316L | $146,1 \pm 7,6$ | $1984,3 \pm 69,3$ |
| LP-DED | | |
| | Sem Boretação | Com Boretação |
| H13 | $561,3 \pm 17,9$ | $1698,5 \pm 66,4$ |
| 316L | $154,2 \pm 6,3$ | $1955,4 \pm 72,6$ |

Com base na tabela 2, observa-se que houve um significativo aumento na dureza quando se compara os processos de fabricação, convencional e pelo LP-DED, em relação ao aço H13. Sobre o aço inoxidável 316L, o aumento visto do H13 só foi observado em amostras não boretadas.

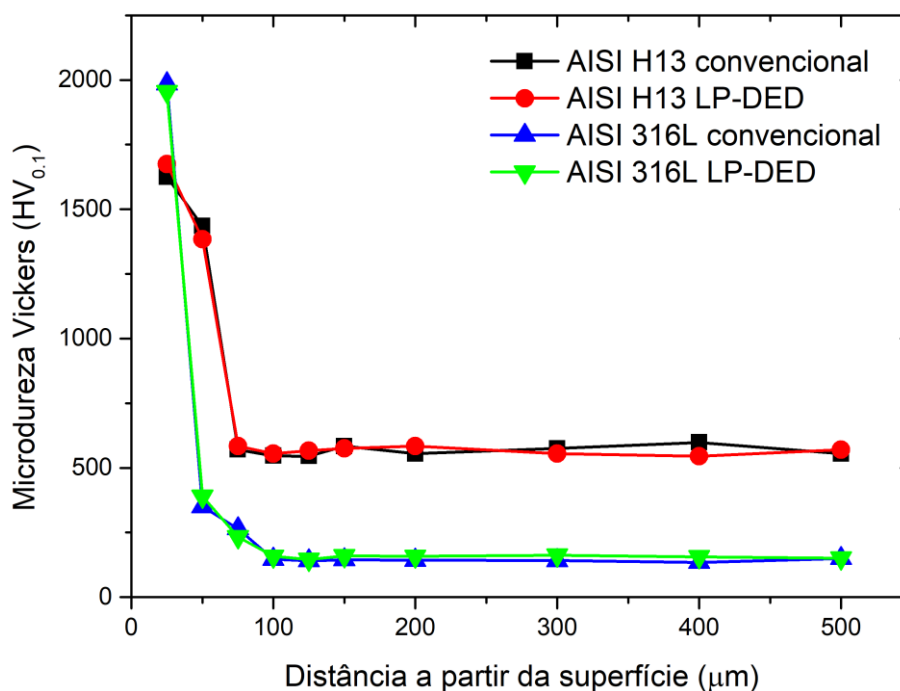
Comparando as amostras de H13 com autores que estudaram a boretação neste aço, Heck (2010) observou a microdureza máxima em boretação de 4 horas, obtendo uma dureza de

1940 HV na superfície, superior ao deste trabalho, 1698,5 HV em que a amostra foi submetida a 6 horas de boretação. Isto se explica, pelo fato de que a dureza em amostras boretadas diminui com o aumento do tempo de exposição ao tratamento. Já em amostras de Oliveira (2006), os valores de dureza se encontraram em torno de 1600 HV na superfície, submetidas ao tratamento de 4h de boretação.

Autores que estudaram a boretação em ligas de 316L obtiveram valores de Microdureza próximos aos encontrados neste estudo, Leon *et al* (2020) obteve em suas amostras submetidas ao tratamento de boretação de 4 h, valores de dureza entre 1930 a 2140 HV para a fase Fe₂B e 1630 a 1835HV para a fase FeB. Domingues-Galícia *et al* (2014) obteve em amostras de 316L, a faixa de dureza de 1650 a 1850 para a fase Fe₂B e 2085 a 2157 HV para a fase FeB, apesar de terem obtido a boretação via sólida, os valores encontrados utilizando o processo de LP-DED e utilizando a boretação líquida está bem próximo aos encontrados por esses autores. Infelizmente não foi possível identificar as fases de boreto neste trabalho, pois a espessura da camada boretada foi muito pequena, em torno de 20 a 50 µm, portanto não foi possível medir os valores de microdureza em cada fase.

Na Figura 14 são apresentados os perfis de microdureza Vickers obtidos para as camadas produzidas nos aços AISI H13 e AISI 316L.

Figura 14 - Perfis de microdureza Vickers obtidos para as camadas boretadas.



Fonte: Próprio autor.

Com relação ao perfil de microdureza, Figura 14, próximo a superfície a dureza da camada de boreto no H13 alcançou valores próximos de 1700 HV para as amostras manufaturadas pelo LP-DED e 1650 HV para o processo convencional. Já para o 316L, os corpos de prova manufaturadas pelo método Convencional alcançou próximo de 2000 HV e 1950 HV para o LP-DED.

À medida que avançamos para o interior, os valores reduzem drasticamente para ambas as ligas, mas para o 316L é mais abrupta, chegando até os valores de dureza do substrato, porém no H13, após a queda do gráfico, os valores de microdureza se mantêm constante em torno de 550 HV, enquanto o aço 316L, se mantêm ao redor de 150 HV.

Em relação a espessura da camada boretada, encontrou-se uma espessura na camada boretada de 316L e H13, em torno de 20 μm e 50 μm , respectivamente. Heck (2010) obteve uma média superior de espessura, em seu perfil de microdureza, em torno de 75 μm , porém este autor observou que após 127 μm houve um aumento da dureza em sua camada boretada, devido a fragilidade do FeB/Fe₂B.

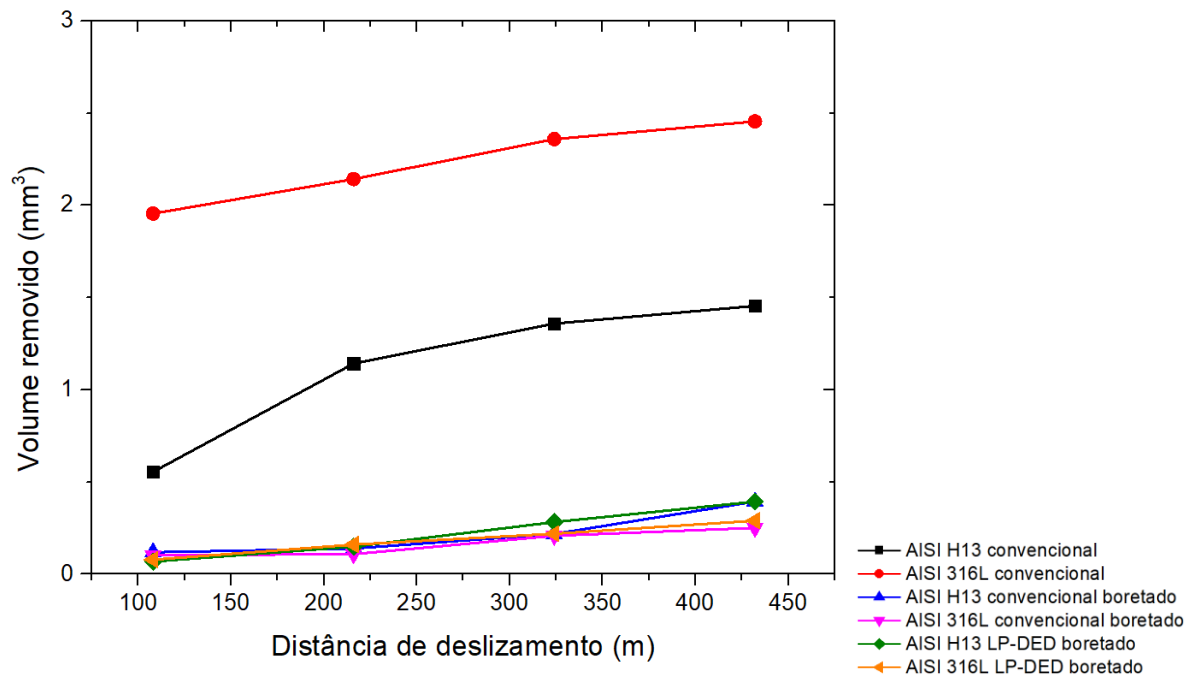
A presença de elementos de liga no aço inoxidável 316L faz com que as camadas de boreto não se adentra ao interior do substrato, fazendo com que o perfil de dureza se reduza mais rapidamente até o valor encontrado no substrato, em comparação com o H13 que possui menos elementos de liga. Este fato também foi evidenciado por Heck (2010) em amostras do aço 1060 e H13.

A figura 15 apresenta as curvas de desgaste dos materiais manufaturados em ambos os métodos e boretados, comparando com os seus respectivos substratos. Pode-se observar que em ambos os aços H13 e 316L manufaturados pelo processo, LP-DED e Convencional, boretados obtiveram uma significativa redução do volume de desgaste, em relação a seus substratos.

Em relação a diferença de processos, percebe-se que não houve uma diferença no volume removido, permaneceram os mesmos valores para os aços H13 e 316L. Como houve uma diferença de dureza, o aço boretado H13 obteve uma resistência ligeiramente superior ao desgaste, comparado com o 316L também tratado.

Na Figura 15 são apresentados os gráficos de desgaste obtidos para os substratos e camadas produzidas.

Figura 15 - Gráficos de desgaste



Fonte: Próprio autor.

CONCLUSÕES

O objetivo desse trabalho consistiu na caracterização de camadas boretadas produzidas nos aços AISI H13 e AISI 316L obtidos por meio de LP-DED, avaliando-se as características microestruturais e tribológicas. Os estudos conduzidos levaram à resultados interessantes e de acordo com o objetivo da pesquisa. Diante dos resultados, podemos concluir que:

- O processo de Manufatura Aditiva de LP-DED tem capacidade de atingir valores de dureza e de resistência ao desgaste em comparação a fabricação convencional;
- Para o aço H13, os valores medidos de microdureza foi ligeiramente superior e obteve a mesma característica de desgaste, em relação ao processo convencional;
- As boretação em 316L produziu camadas menos espessas quando comparadas ao H13, devido à maior dificuldade de difusão do boro no aço 316L, causada pela maior quantidade de elementos de liga no mesmo;
- Para valores de microdureza das amostras de 316L confeccionadas pela Manufatura Aditiva não foi superior ao fabricadas pelos processos convencionais, porém obteve um comportamento próximo no ensaio de desgaste e também no perfil de microdureza.

ESTUDOS FUTUROS

O trabalho descrito ainda necessita de estudos adicionais, como por exemplo, análises por meio da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), difração de raio-X (DRX) para avaliar as fases de boretos na camada.

Para avaliar a variação da camada boretada, pôde-se estudar o tratamento com outras faixas de tempo para amostras submetidas à Boretação Líquida.

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 em diferentes propriedades.

Pode-se também estudar a resistência mecânica, com ensaios mecânicos de tração, compressão e flexão em amostras boretadas e comparar com os valores da Manufatura Aditiva, utilizando o método de Laser Powder Direct Energy Deposition (LP-DED).

REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO/ASTM 52900: Manufatura Aditiva — Princípios Gerais — Terminologia Rio de Janeiro. ABNT, , 2018

ALMEIDA, Júlia Fornaziero de. Adoção de Manufatura Aditiva (MA) para metais em empresas : identificação de barreiras e proposta de roteiro para implementação [doi:10.11606/D.18.2021.tde-23082021-180414]. São Carlos : Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, 2021. Master's Dissertation in Processos e Gestão de Operações. [cited 2021-12-06].

ASM Handbook, Volume 24, Additive Manufacturing Processes D. Bourell, W. Frazier, H. Kuhn, M. Seifi, editors DOI 10.31399/asm.hb.v24.a0006549

ASTM INTERNATIONAL. ASTM F2792: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. p. 2–4, 2012

ASTM A681-08(2015), Standard Specification for Tool Steels Alloy, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org

BINDAL, C., UCISIK, A. H. "An investigation on boriding kinetics of AISI 316 stainless steel", Vacuum, v. 83, pp. 175-179, 2008.

CARRERA-ESPINOZA, Rafael et al. Tribological behavior of borided AISI 1018 steel under linear reciprocating sliding conditions. Wear, [S. l.], v. 362-363, p. 1-7, 15 set. 2016. DOI <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164816300795?via%3Dihub#!>. Acesso em: 8 set. 2021.

CHEN, C., Yan, K., Qin, L. et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Additively Manufactured AISI H13 Tool Steel. J. of Materi Eng and Perform 26, 5577–5589 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2992-0>

CULHA, O., TOPARLI, M., SAHIN, S., et al. “Characterization and determination of FexB layers’

mechanical properties”, Journal of materials processing technology, n. 206, pp. 231-240, December, 2007

DIAS, Fernanda. Entenda o grande impacto da Manufatura Aditiva no desenvolvimento e produção de inovações: A manufatura aditiva é um dos pilares da Indústria 4.0 e promete revolucionar ainda mais o mercado global por meio de produtos altamente tecnológicos e inovadores.. In: DIAS, Fernanda. **Manufatura Aditiva: O que é e como Funciona**: Indústria 4.0. Voitto, 11 ago. 2020. Disponível em: <https://www.voitto.com.br/blog/artigo/manufatura-aditiva>. Acesso em: 8 nov. 2021.

DOMÍNGUEZ-GALICIA, Y. M et al. A Study on the Effect of the Boron Potential on the Mechanical Properties of the Borided Layers Obtained by Boron Diffusion at the Surface of AISI 316L Steel. Advances in Materials Science and Engineering, [s. l.], v. 2014, 9 nov. 2014. DOI <https://doi.org/10.1155/2014/249174>. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2014/249174/>. Acesso em: 10 out. 2021.

DO-SIK SHIM, Gyeong-Yun Baek, Jin-Seon Seo, Gwang-Yong Shin, Kee-Poong Kim, Ki-Yong Lee. Effect of layer thickness setting on deposition characteristics in direct energy deposition (DED) process, Optics & Laser Technology, Volume 86, 2016, Pages 69-78, ISSN 0030-3992, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.07.001>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399216302584>)

DYER, Ezra. The World’s First 3D-Printed Car Is a Blast to Drive: A little quality time behind the wheel of the Local Motors Strati roadster.. In: DYER, Ezra. The World’s First 3D-Printed Car Is a Blast to Drive. Popular Mechanics: Ezra Dyer, 7 ago. 2015. Disponível em: <https://www.popularmechanics.com/cars/a16726/local-motors-strati-roadster-test-drive/>. Acesso em: 10 nov. 2021.

FRAZIER, W.E. Metal Additive Manufacturing: A Review. J. of Materi Eng and Perform 23, 1917–1928 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>

GALLIANO, P., De Damborenea, J.J., Pascual, M.J. et al. Sol-Gel Coatings on 316L Steel for Clinical Applications. *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 13, 723–727 (1998). <https://doi.org/10.1023/A:1008653208083>

GARCÍA-LEÓN, R. A., J. Martinez-Trinidad, I. Campos-Silva, y W. Wong-Angel. «Mechanical characterization of the AISI 316L alloy exposed to boriding process». *DYNA*, vol. 87, n.º 213, abril de 2020, pp. 34-41, doi:10.15446/dyna.v87n213.82924.

HECK, Stênio Cristaldo. Influência da boretação com pó na resistência ao desgaste, corrosão e oxidação dos aços AISI 1060 e AISI H13 [doi:10.11606/D.88.2010.tde-06012011-091204]. São Carlos : Ciência e Engenharia de Materiais, University of São Paulo, 2010. Master's Dissertation in Ciência e Engenharia de Materiais. [cited 2021-11-11].

JAVIDANI, M., Arreguin-Zavala, J., Danovitch, J. et al. Additive Manufacturing of AlSi10Mg Alloy Using Direct Energy Deposition: Microstructure and Hardness Characterization. *J Therm Spray Tech* 26, 587–597 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11666-016-0495-4>

KAKINUMA, Yasuhiro et al. Influence of metal powder characteristics on product quality with directed energy deposition of Inconel 625. *CIRP Annals*, [s. l.], v. 65, ed. 1, p. 209-212, 10 fev. 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.058>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850616300580>. Acesso em: 10 nov. 2021.

KARIOFILLIS, George K.; KIOURTSIDIS, Grigoris E; TSIPAS, Dimitrios N. Corrosion behavior of borided AISI H13 hot work steel. *Surface & Coatings Technology*, [s. l.], ano 2006, v. 201, p. 19-24, 13 dez. 2005. DOI <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.10.025>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897205011266?via%3Dihub>. Acesso em: 5 ago. 2021.

KAYALI, Y., Büyüksağış, A. & Yalçın, Y. Corrosion and wear behaviors of boronized AISI 316L stainless steel. *Met. Mater. Int.* 19, 1053–1061 (2013). <https://doi.org/10.1007/s12540-013-5019-x>

KRELLING, Anael P. et al. Micro-abrasive wear mechanisms of borided AISI 1020 steel. *Tribology International*, [s. l.], v. 111, p. 234-242, 27 jul. 2017. DOI <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.03.017>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X17301330#!>. Acesso em: 5 set. 2021.

KULKA, Michael et al. Wear resistance improvement of austenitic 316L steel by laser alloying with boron. *Surface and Coatings Technology*, [S. l.], v. 291, p. 292-313, 15 abr. 2016. DOI <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.02.058>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897216301177#!>. Acesso em: 8 set. 2021.

LEANDRO, C.A.S. Efeito da Implantação Iônica por Imersão em Plasma no Aço Ferramenta H13. 2004. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá

LEE, Jae-Ho, Jeong-Hwan JANG, Byeong-Don JOO, Hong-Sup YIM, Young-Hoon MOON,

Application of direct laser metal tooling for AISI H13 tool steel, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Volume 19, Supplement 1, 2009, Pages s284-s287, ISSN 1003-6326, [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(10\)60286-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(10)60286-5).

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632610602865>)

MARIANI, Fábio Edson. Tratamentos térmicos e termoquímicos de boroaustêmpera em ferros fundidos nodulares e caracterização dos produtos resultantes [doi:10.11606/D.18.2014.tde-05092014-082721]. São Carlos : Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014. Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais. [acesso 2021-11-10].

MARIANI, F.E., Ribeiro, K.S.B., Lombardi, A.N. et al. Effect of Laser Polishing Post-Processing Technique on the Roughness and Wear Resistance of Inconel 625 Deposited by Laser Cladding on AISI 304L Stainless Steel. *J. of Materi Eng and Perform* 30, 6713–6721 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05962-3>

MARTUKANITZ, Richard P. Directed-Energy Deposition Processes. In: ADDITIVE Manufacturing Processes. [S. l.]: ASM Handbook, 2020. v. 24, cap. 24, p. 220-237. ISBN 978-162708-288-4.

MATIASOVSKÝ, K.; CHRENKOVÁ-PAUCIROVÁ, M.; FELLNER, P.; MAKTA, M. Electrochemical and Thermochemical boriding in molten salts. *Surf. Coat. Technol.* V.35, p.133-149, 1988.

OLIVEIRA, Carlos Kleber Nascimento de. Revisão Bibliográfica. In: OLIVEIRA, Carlos Kleber Nascimento de. Avaliação de Camadas de Carbonetos e de Boretos Produzidos em Aços AISI H13 e D2 por meio de Tratamentos Termo-reativos. Orientador: Prof. Dr. Luis Carlos Casteletti. 2006. Tese (Doutor em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos - USP, EESC-IFSC-IQSC, 2006. f. 136. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-24072006-093455/publico/tese_KleberOliveira.pdf. Acesso em: 10 nov. 2021.

ÖZBEK, İbrahim & Konduk, B. & Bindal, C. & Ucisik, A.. (2002). Characterization of borided AISI 316L stainless steel implant. *Vacuum*. 65. 521-525. 10.1016/S0042-207X(01)00466-3.

ÖZDEMİR, N., Bilgin, B. Interfacial properties of diffusion bonded Ti-6Al-4V to AISI 304 stainless steel by inserting a Cu interlayer. *Int J Adv Manuf Technol* 41, 519–526 (2009). <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1493-6>

POLLNOW, Edilson Nunes et al. “Avaliação microestrutural de um aço de baixo carbono submetido ao tratamento de boretção pré e pós-soldagem GTAW.” *Materia-rio De Janeiro* 22 (2017): n. pag.

ROSEN, David, et al. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Alemanha, Springer New York, 2016.

SANTOS, L. C. P. Análise de rugosidade e energia superficial de amostra fabricada por manufatura aditiva visando aplicação em implantes dentários. 2018. 50 f. Trabalho de

Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

SEN, Saduman; SEN, Ugur; BINDAL, Cuma. An approach to kinetic study of borided steels. *Surface and Coatings Technology*, [S. l.], v. 291, p. 292-313, 15 abr. 2016. DOI <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.03.040>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S025789720400297X?via%3Dihub>. Acesso em: 8 ago. 2021.

SHALNOVA, Svetlana A. et al. Effect of recycled powder content on the structure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy produced by direct energy deposition. *Journal of Alloys and Compounds*, [s. l.], v. 893, n. 162264, ed. 0925-8388, 10 fev. 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162264>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838821036744>. Acesso em: 10 nov. 2021.

STACHOWIAK, G. *Wear: materials, mechanisms and practice*. Chichester. West Sussex, England: John Wiley and Sons LTD, 2006. STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. *Engineering tribology*. Chichester. West Sussex, England: Butterworth-Heinemann, 2013

STEEL: A HANDBOOK FOR MATERIALS RESEARCH AND ENGINEERING, Verein Deutscher Eisenhüttenteute, vol.2: Applications, pp.335-337, 1993.

THOMAS-SEALE, L.E.J et al. The barriers of the progression of additive manufacture: Perspectives from UK industry. **International Journal of Production Economics**, v.198, p.104-118, 1 abr. 2018.

USLU, I., COMERT, H., IPEK, M., et al., "Evaluation of borides formed on AISI P20 steel", *Materials and Design*, v. 28, pp. 55-61, 2007.

YAN, J.; Zhou, Y.; Gu, R.; Zhang, X.; Quach, W.-M.; Yan, M. A Comprehensive Study of Steel Powders (316L, H13, P20 and 18Ni300) for Their Selective Laser Melting Additive Manufacturing. *Metals* 2019, 9, 86. <https://doi.org/10.3390/met9010086>

YANG, Y., Lu, J., Luo, Z. and Wang, D. (2012), "Accuracy and density optimization in directly fabricating customized orthodontic production by selective laser melting", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 18 No. 6, pp. 482-489. <https://doi.org/10.1108/13552541211272027>

ZHONG, Yuan et al. "Additive manufacturing of 316L stainless steel by electron beam melting for nuclear fusion applications." *Journal of Nuclear Materials* 486 (2017): 234-245.