



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM ENGENHARIA MECÂNICA

André Carvalho Martins

Tratamento de superfície em substratos de aço da indústria farmacêutica via laser de CO₂

Goiânia
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

[X] Dissertação [] Tese [] Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

André Carvalho Martins

3. Título do trabalho

“Tratamento de superfície em substratos de aço da indústria farmacêutica via laser de CO₂”

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a)** consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);
- b)** novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.



Documento assinado eletronicamente por **Andre Contin, Professor do Magistério Superior**, em 02/11/2023, às 21:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **André Carvalho Martins, Discente**, em 14/11/2023, às 16:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4161946** e o código CRC **CCC8455C**.

André Carvalho Martins

Tratamento de superfície em substratos de aço da indústria farmacêutica via laser de CO₂

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Dr. André Contin

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Fernandes da Cunha

Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

Goiânia
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG

Martins, André Carvalho

Tratamento de superfície em substratos de aço da indústria
farmacêutica via laser de CO₂ [manuscrito] / André Carvalho
Martins. - 2022.

LIII, 53 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. André Contin; co-orientador Dr. Daniel
Fernandes Cunha.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Pró
reitoria de Pós-graduação (PRPG), Programa de Pós-graduação em
Engenharia Mecânica, Goiânia, 2022.

Bibliografia.

1. Laser CO₂. 2. Aço Inox. 3. Tratamento superficial. 4. Cementação.
5. Revestimento a laser. I. Contin, André, orient. II. Título.

CDU 669



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 05 da sessão de Defesa de Dissertação de **André Carvalho Martins**, que confere o título de Mestre em **Engenharia Mecânica**, na área de concentração em **Ciências Mecânicas**.

Aos **trinta e um dias do mês de agosto de dois mil e vinte e três**, a partir das **08h00 min** realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada **“Tratamento de superfície em substratos de aço da indústria farmacêutica via laser de CO2”**. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **André Contin - (FCT/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor, **Daniel Fernandes da Cunha - (EMC/UFG)** Coorientador, Professor Doutor **Demostenes Ferreira Filho - (EMC/UFG)** Membro Titular Interno e Professor Doutor **Jonas Bertholdi - (FCT/UFG)** Membro Titular Externo: **cujas participações ocorreram na EMC/UFG**. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor Andre Contin, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos trinta e um dias do mês de agosto de dois mil e vinte e três.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **André Contin, Professor do Magistério Superior**, em 31/08/2023, às 11:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jonas Bertholdi, Professor do Magistério Superior**, em 31/08/2023, às 11:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Demóstenes Ferreira Filho, Professor do Magistério Superior**, em 31/08/2023, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Fernandes Da Cunha, Professor do Magistério Superior**, em 31/08/2023, às 11:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4001142** e o código CRC **5E6C6B8F**.

Dedico este trabalho a minha esposa, que sempre acreditou em mim e a meu orientador, que me apoiou, ajudou e se dedicou nesta conclusão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Orientador, professor Dr. André Contin, por sua ajuda, dedicação e paciência em ensinar, também em fornecer o pó negro de fumo que foi utilizado no experimento e principalmente por tornar possível a conclusão deste trabalho.

Agradeço a minha esposa Lúrien Martins por sempre me apoiar a estudar e que foi muito importante para a conclusão.

Agradeço a UFG por disponibilizar ao LAMAF-Materiais e o LAMAF-Usinagem para ensaios e análises das amostras.

Agradeço ao meu Coorientador Dr. Daniel Fernandes da Cunha por nos mostrar e ensinar sobre o equipamento laser utilizado.

Agradeço ao Dr. Filipe Estevão de Freitas e a Anton Paar Brasil pelas análises de tribologia.

Agradeço ao CNPQ pelos recursos financeiros oriundos do Processo: 425037/2018-5.

*“Se não puder voar, corra. Se não puder correr, ande. Se não puder andar, rasteje,
mas continue em frente de qualquer jeito.”*

Martin Luther King.

RESUMO

Os aços inoxidáveis AISI 304 desempenham um papel crucial na indústria farmacêutica devido à sua resistência à reatividade química. No entanto, sua resistência ao desgaste é limitada em ambientes de alta temperatura e pressão. O tratamento via laser surge como uma abordagem promissora para melhorar sua resistência ao desgaste e diminuir seu coeficiente de atrito. Neste estudo, um laser de CO₂ de 100 W de baixo custo é utilizado para o tratamento superficial dos aços AISI 304, com adição do pó de negro de fumo. Os resultados mostraram um aumento significativo na dureza superficial após o tratamento a laser em comparação com o substrato não tratado. Análises via EDS revelaram a presença de carbono na superfície dos substratos. Além do aumento da dureza superficial, o coeficiente de atrito das amostras tratadas via laser foi diminuído quando comparado com o substrato referência. Enfim, o negro de fumo atuou como material foto absorvedor da radiação, fonte de carbono para o aumento da dureza superficial e como lubrificante sólido. Esses resultados evidenciam a viabilidade do uso de um laser de CO₂ de baixo custo como uma alternativa eficiente, versátil e rápida para melhorar as propriedades dos materiais empregados na indústria farmacêutica.

Palavras-chaves: Laser CO₂; Aço Inox; Tratamento superficial; Cementação; Revestimento a laser

ABSTRACT

AISI 304 stainless steels play a crucial role in the pharmaceutical industry due to their resistance to chemical reactivity. However, their wear resistance is limited in high-temperature and high-pressure environments. Laser treatment emerges as a promising approach to enhance their properties. In this study, a low-cost 100 W CO₂ laser is used for the surface treatment of AISI 304 steels, with the addition of carbon black powder. The results showed a significant increase in surface hardness after laser treatment compared to the untreated substrate. EDS analyses revealed the presence of carbon on the surface of the substrates. In addition to the increased surface hardness, the coefficient of friction of the laser-treated samples was reduced when compared to the reference substrate. Ultimately, carbon black acted as a photoabsorbing material for radiation, a source of carbon for increasing surface hardness, and as a solid lubricant. These results demonstrate the viability of using a low-cost CO₂ laser as an efficient, versatile, and rapid alternative to improve the properties of materials employed in the pharmaceutical industry.

Keywords: CO₂ laser; Stainless steel; Superficial treatment; Cementation; Laser cladding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Técnicas de processamento via laser.....	14
Figura 3.2 – Tipos de alimentação: (a) coaxial e (b) pré-depositado	16
Figura 3.3 – Formação de zonas na interface	17
Figura 3.4 - Taxa de diluição.....	19
Figura 3.5 - Refletância para materiais metálicos em função da radiação eletromagnética.....	20
Figura 4.1 - (a) Substrato recoberto com negro de fumo, (b) processo de irradiação via laser	23
Figura 5.1 – Fotografia da superfície do substrato com a carta de processo.....	27
Figura 5.2.1 – Micrografia da superfície do retângulo 1. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.	28
Figura 5.2.2 – Micrografia da superfície do retângulo 2. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação	29
Figura 5.2.3 – Micrografia da superfície do retângulo 3. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.	30
Figura 5.2.4 – Micrografia da superfície do retângulo 4. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.	31
Figura 5.2.5 – Micrografia da superfície do retângulo 5. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.	32
Figura 5.2.6 – Micrografia da superfície do retângulo 6. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.	33
Figura 5.2.7 – Micrografia da superfície do retângulo 7. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.	34
Figura 5.2.8 – Micrografia da superfície do retângulo 8. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.	35
Figura 5.2.9 – Micrografia da superfície do retângulo 9. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.	36
Figura 5.2.10 – Micrografia da superfície do retângulo 10. A nomenclatura .1 corresponde as	

micrografias em maior magnificação.	37
Figura 5.2.11 – Micrografia da superfície do retângulo 11. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.	38
Figura 5.2.12 – Micrografia da superfície do retângulo 12. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.	39
Figura 5.2.13 – Micrografia da superfície do retângulo 13. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.	40
Figura 5.3 – Microdureza Vickers dos substratos antes e após a irradiação via laser	41
Figura 5.4 – Fotografia da seção reta do substrato	42
Figura 5.5 – Gráfico de Microdureza $HV_{0,01}$ da seção transversal dos substratos 01 e 02 e 03.	43
Figura 5.6 – Escaneamento em linha da seção reta do substrato 01.....	44
Figura 5.7 – Escaneamento em linha da seção reta do substrato 02.....	46
Figura 5.8 – Escaneamento em linha da seção reta do substrato 03.....	47
Figura 5.9 – Imagem MEV e EDS da superfície do substrato 01.	49
Figura 5.10 — Imagem MEV e EDS da superfície do substrato 02.	50
Figura 5.11 — Gráfico do coeficiente de atrito das amostras.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Carta de Processo.....	24
Tabela 4.2 – Parâmetros escolhidos	24
Tabela 4.3 – Fluxograma das etapas do trabalho.....	25
Tabela 5.1 – Média de aumento de microdureza Vickers nas superfícies dos substratos.	42
Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios tribológicos	52

LISTA DE SÍMBOLOS

μm	Micrometro
HV	Dureza Vickers
W	Watts
LAMAF	Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação
UFG	Universidade Federal de Goiás
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
EDS	Espectroscopia por Energia Dispersiva
Ti	Titânio
Ni	Níquel
Cr	Cromo
CO ₂	Dióxido de Carbono
gf	Gramma-força
nm	Nanômetro
mL	Mililitro
s	Segundo
J	Joule
%	Porcentagem
ppi	Pontos por polegadas
mm ²	Milímetro quadrado
mm/s	Milímetros por segundo
J/mm ²	Joule por milímetro quadrado
ppi	Pulsos por polegadas

SUMÁRIO

1. PROBLEMA DE PESQUISA FUNDAMENTADO	9
2. OBJETIVOS.....	11
2.1 OBJETIVO GERAL	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3. REVISÃO DE LITERATURA	12
3.1 HISTÓRIA DO LASER	12
3.2 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DO LASER.....	12
3.3 PROCESSAMENTO VIA LASER	13
3.4 PROPRIEDADES DO AÇO AISI 304	21
4. METODOLOGIA	22
4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	22
4.2 PROCESSO DE IRRADIAÇÃO VIA LASER.....	22
4.3 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO	25
5. RESULTADOS.....	27
5.1 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1. PROBLEMA DE PESQUISA FUNDAMENTADO

Os aços inoxidáveis são aplicados na indústria farmacêutica devido à sua alta resistência à corrosão e boas propriedades mecânicas. Essas características são essenciais já que os medicamentos produzidos devem obedecer a padrões de pureza e qualidade (ZAFFORA et al., 2021). Os aços inoxidáveis AISI 316L, aço liga 422 também são empregados como material estrutural nas indústrias de petróleo e gás, refinarias, produtos químicos, petroquímicos, no entanto, há uma baixa resistência ao desgaste do aço em aplicações prolongadas (MAJUMDAR; KUMAR; LI, 2009). Dentre os tipos de aços inoxidáveis, os aços inoxidáveis austeníticos são os mais empregados nas indústrias farmacêuticas e alimentícias em razão da resistência a corrosão e ausência de contaminação no processo de produção (MICHLER, 2016). No entanto, o desgaste é um dos maiores problemas encontrados na indústria farmacêutica já que os aços inoxidáveis são as bases de selos mecânicos, retentores, entre outras peças que possuem movimento relativo que estão em contato constante e em alta rotação.

O incremento da dureza e resistência ao desgaste podem ser obtidos alterando as propriedades superficiais desses materiais. Os aços inoxidáveis austeníticos não são sujeitos a tratamentos térmicos de endurecimento. Além de endurecimento por deformação a frio (ALVES; BRANDAO; PAULA, 2019), uma das possibilidades encontradas na literatura é a nitretação a plasma em temperaturas inferiores a 450 °C (TSCHIPTSCHIN; PINEDO, 2010).

Os tratamentos superficiais modernos incluem o laser como fonte de calor; o laser apresenta vantagens sobre as técnicas convencionais de modificação de superfícies, como a precisão, mínima distorção térmica, facilidade de automação, controle do processo, tratamento superficial em áreas pequenas (KATSAMAS; HAIDEMENOPOULOS, 2001). O processamento de materiais a laser é empregado em várias aplicações, como perfuração, corte, soldagem, endurecimento superficial (MORADI; KARAMIMOUGHADAM; KAZAZI, 2018).

No entanto, para o comprimento de onda da radiação eletromagnética do laser de CO₂, a reflexão é de cerca de 90% para substratos de aço. A alternativa empregada nesse trabalho é o emprego de um material foto absorvedor de radiação, como o negro de fumo. Além do mais, o teor de carbono presente no substrato é aumentado devido a difusão do carbono presente no aditivo, mecanismo conhecido como cementação no estado sólido via laser (KATSAMAS; HAIDEMENOPOULOS, 2001).

No trabalho de Vasconcelos foi empregado o pó de negro de fumo como material foto absorvedor em um aço SAE 4340. Com a aplicação do pó sobre a superfície do substrato e subsequente irradiação via laser de CO₂ de 50 W, houve um incremento na dureza superficial

da amostra, de 286 HV_{0,05} para 760 HV_{0,05}. O emprego de nanopartículas de negro de fumo auxiliou na absorção da radiação incidente de um laser de CO₂ de baixa potência e promoveu o processo de endurecimento superficial, (VASCONCELOS et al., 2012).

Neste trabalho empregou-se um laser de CO₂ de 100 W de baixo custo com a aplicação de pó de negro de fumo para modificar a superfície do aço inoxidável 304 e consequentemente aumentar a vida útil do substrato. Esse aspecto traz inovação ao estudo em relação à literatura existente.

Além desta introdução, no segundo capítulo estão descritos seus objetivos. No terceiro capítulo são apresentadas as revisões bibliográficas sobre a história do laser, processamento via laser. Também é feita uma descrição dos procedimentos experimentais, no quarto capítulo. No quinto capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos durante o desenvolvimento do trabalho. O sexto capítulo é destinado às conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Esta dissertação tem como objetivo geral:

Analisar a utilização de um laser de CO₂ de baixa potência e custo no tratamento superficial de substratos de aço AISI 304 recobertos com negro de fumo.

2.2 Objetivos Específicos

- Aumentar a dureza superficial do substrato;
- Estabelecer os melhores parâmetros de irradiação via laser com negro de fumo;
- Investigar a viabilidade do uso do laser de baixa potência para o tratamento do aço AISI 304 utilizando o negro de fumo.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 História do Laser

O laser é a sigla para "*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*" (Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação); é uma fonte de luz coerente e intensa que tem encontrado uma ampla gama de aplicações em diversas áreas. Suas propriedades são: monocromaticidade (a mesma cor), coerência (ondas de luz estão em fase espacial e temporalmente), colimação (raios são paralelos entre si e não divergem significativamente mesmo em longas distâncias (TAKAC S, 1999).

Theodore Maiman foi o primeiro a construir um laser funcional (RAWICZ, 2008). Em 1960, utilizando um cilindro de rubi, Maiman criou o primeiro laser sólido operando na região do espectro visível (MAIMAN, 2018). Esse marco histórico abriu caminho para o rápido desenvolvimento e aperfeiçoamento de diferentes tipos de lasers, como os lasers a gás, lasers semicondutores e lasers de estado sólido.

3.2 Princípios de Funcionamento do Laser

O funcionamento básico de um laser envolve um meio ativo, que pode ser um sólido, líquido ou gás, uma cavidade ressonante e uma fonte de energia. O meio ativo recebe energia externa, o que provoca a excitação dos átomos ou moléculas do meio ativo para um estado de alta energia (SALEH; TEICH, 2019).

Quando a energia é fornecida ao átomo do meio ativo, os elétrons se movem de seus orbitais de baixa energia para orbitais de alta energia, isto é, migram do nível de energia do estado fundamental para um estado excitado. Um elétron em um orbital de alta energia eventualmente retorna ao orbital de baixa energia, a diferença de energia é liberada na forma de um fóton. Este processo é conhecido como emissão espontânea. Agora, se o fóton colidir com outro elétron excitado no meio ativo, fará com que um segundo fóton seja liberado idêntico ao fóton original, isto é, mesma direção, fase, polarização e comprimento de onda, esse processo é conhecido como emissão estimulada de radiação (WILLIAMS, 2008).

A emissão estimulada ocorre quando um fóton incidente estimula a transição de um átomo ou molécula do estado excitado para o estado fundamental (SALEH; TEICH, 2019).

Os fótons são inicialmente liberados em direções aleatórias. No entanto, à medida que a reação em cadeia progride, os fótons são refletidos múltiplas vezes entre os espelhos da cavi-

dade ressoante (composta por dois espelhos, um dos quais é parcialmente refletor) e amplificados a cada passagem pelo meio ativo (WILLIAMS, 2008). A escolha do meio ativo e das características da cavidade ressonante depende da aplicação desejada do laser.

3.3 Processamento via laser

As ligas de engenharia são formadas por materiais metálicos, tais como: ferro, titânio, alumínio, níquel e materiais não metálicos, como o carbono, nitrogênio, oxigênio. Essas ligas exibem propriedades ímpares, tais como: baixa densidade, resistência a alta temperatura, resistência a corrosão. Por outro lado, exibem algumas desvantagens, como baixa dureza, elevado coeficiente de atrito, baixa resistência ao desgaste, (LIU et al., 2021). Como por exemplo, as ligas de magnésio e titânio são empregadas no setor aeroespacial visto que possuem boa tenacidade e baixa densidade, no entanto, existem limitações para aplicações em ambientes de elevada temperatura e alto desgaste (XUE et al., 2021).

As condições em uso não ideais das ligas estão principalmente relacionadas com as propriedades de superfície e, portanto, as soluções consistem na modificação superficial desses materiais.

Na literatura existem inúmeras técnicas com o intuito de modificação superficial, dentre elas podemos citar: Tratamento de superfície via laser, Deposição Física em Fase Vapor (PVD), Deposição Química em Fase Vapor (CVD), Pulverização Térmica, Eletrodeposição (SIDDIQUI et al. 2021).

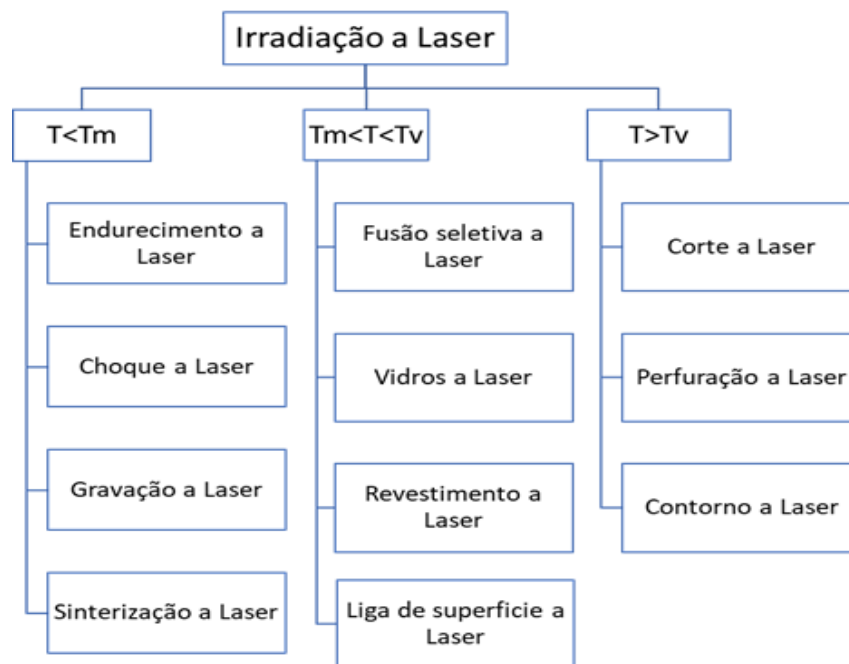
O objetivo do tratamento térmico a laser é o endurecimento seletivo da superfície, como também na alteração nas propriedades metalúrgicas do substrato. Os usos práticos do tratamento térmico a laser incluem: aumento da dureza, diminuição do coeficiente de atrito, redução do desgaste, aumento da vida em fadiga, têmpera superficial (STEEN; MAZUMDER, 2010).

O emprego de tecnologias a laser permite uma combinação de baixa diluição do substrato, controle da zona afetada pelo calor, boa aderência do revestimento ao substrato, repetibilidade, rápido tempo de processo, penetração térmica controlada, facilidade de automatização, perfil térmico controlado (XUE et al., 2021); (STEEN; MAZUMDER, 2010).

Os tratamentos empregam um laser como fonte de calor, desse modo, as técnicas de processamento são classificadas conforme a temperatura superficial atingida durante o processamento, sendo: laser por choque (*shock peening*), gravação a laser (*engraving*), fusão seletiva via laser (*selective laser melting*), sinterização seletiva a laser (*sintering*), vitrificação via laser (*glazing*), revestimento via laser (*laser cladding*) e liga de superfície a laser (*laser surface*

alloying), endurecimento via laser (*laser hardening*) entre outras, (SIDDQUI et al. 2021). A Figura 3.1 mostra as técnicas de processamento via laser conforme a temperatura da superfície, onde T_m é a temperatura de fusão e T_v é a temperatura de vaporização.

Figura 3.1 – Técnicas de processamento via laser



Fonte: (SIDDQUI et al. 2021) adaptado.

O tratamento de superfície a laser por choque, também conhecido como *laser shock peening* (LSP), é uma técnica de processamento de materiais que utiliza pulsos de laser de alta energia para gerar ondas de choque na superfície do material, resultando em compressão e endurecimento da camada superficial. Essa técnica pode ser utilizada para melhorar a resistência à fadiga, à corrosão e à fratura dos materiais (PARK et al., 2018).

A fusão seletiva a laser emprega um laser de alta densidade de energia para fundir pós-metálicos e criar peças em três dimensões, manufatura aditiva. Durante a irradiação, o pó se funde e rapidamente se solidifica camada por camada para gerar componentes com geometrias complexas. Após cada irradiação, a plataforma de construção da peça em três dimensões é abaixada e uma nova aspersão de pó é feita na superfície da peça e subsequente irradiada via laser (CAI et al., 2022).

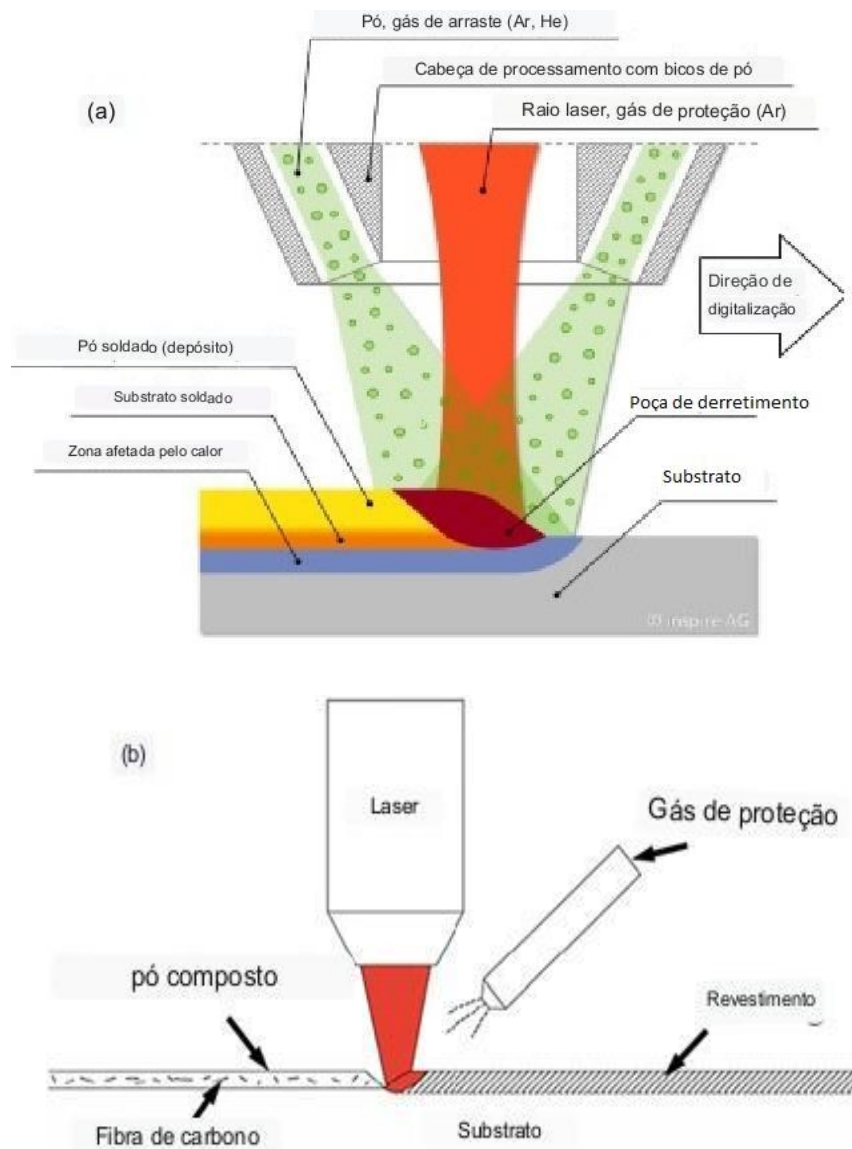
O processo de sinterização seletiva a laser é semelhante ao de fusão seletiva a laser, ou seja, é uma técnica de manufatura aditiva que cria estruturas em três dimensões, pelo processo de sinterização das partículas de pós (CERDAN et al., 2022).

A vitrificação via laser (*laser glazing*) é uma técnica de fusão e refusão de uma camada superficial do substrato; a superfície resultante assemelha-se a um vidro, com baixa rugosidade superficial, baixa porosidade. É uma técnica útil para melhoria de propriedades de revestimentos de barreira térmica (BATISTA et al., 2005).

Outros dois processos via laser, tais como: Revestimento a laser (*laser cladding*) e liga de superfície via laser (*laser surface alloying*) incluem a alteração das propriedades superficiais, devido a adição de materiais na superfície do substrato, geralmente na forma de pó. No processo de liga de superfície via laser ocorre a formação de uma liga, entre o substrato e o material adicionado; para isso é empregada elevada densidade de energia. Já no processo de revestimento a laser (*laser cladding*), a fonte de calor é empregada para formar um revestimento denso e aderido ao substrato, além disso, a mistura entre o substrato e o material adicionado é negligenciada (SIDDIQUI et al. 2021).

Os sistemas de alimentação do processo de laser cladding mais empregados são: coaxial e pré-depositado conforme mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Tipos de alimentação: (a) coaxial e (b) pré-depositado

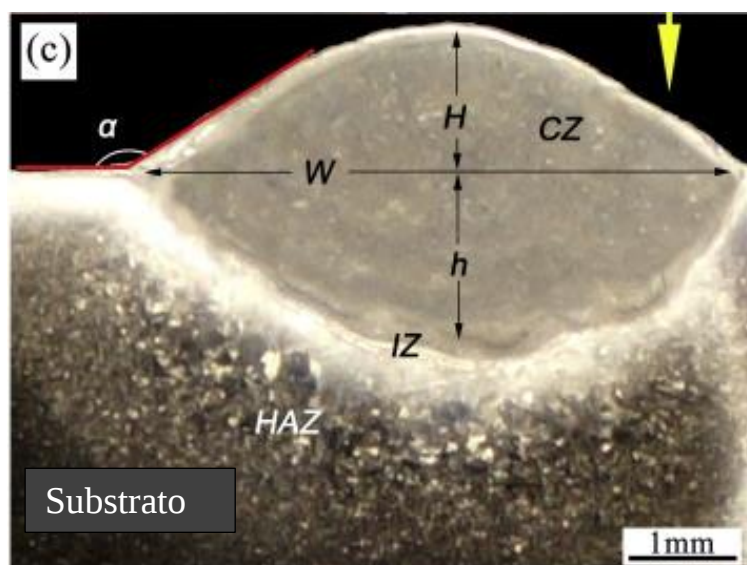


Fonte: Adaptado de: (LEI et al., 2018); (WIRTH; WEGENER, 2018)

No primeiro, o gás de proteção é empregado para ejetar as partículas de pó sobre a superfície do substrato e simultaneamente o pó e a superfície são irradiados pelo feixe de laser. Já no sistema de pré-deposição, o primeiro estágio consiste na pulverização do pó sobre a superfície do substrato, geralmente feito por uma pistola pneumática, seguido da irradiação do feixe do laser no qual o calor é absorvido pela camada em pó pulverizada e transferido ao substrato para formar o revestimento (ZHU et al., 2021) , (LEI et al., 2018).

Geralmente, o processo de laser cladding gera quatro zonas na interface substrato/revestimento, nomeadas de: substrato, zona afetada pelo calor (HAZ), zona interfacial (IZ) e zona de revestimento (CZ), (LIU et al., 2015), como mostrado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Formação de zonas na interface



Fonte: (LIU et al., 2015).

O endurecimento via laser é um processo de aumento da dureza superficial devido ao aquecimento induzido pela irradiação via laser acima da temperatura de austenitização da peça e consequente elevada taxa de resfriamento, transformando a austenita em martensita (LU et al., 2021). À medida que o feixe se move sobre o substrato, a temperatura do substrato se eleva e a energia térmica é conduzida para o substrato. A temperatura atingida é maior que a temperatura crítica de transformação, mas menor que a temperatura de fusão. Após a passagem do feixe, o resfriamento ocorre pelo processo de têmpera (STEEN; MAZUMDER, 2010).

Independente das técnicas de processamento via laser, existem vários fatores que afetam a qualidade do revestimento a laser, como a potência do laser (P), o tamanho do feixe de laser (diâmetro do feixe D) e a velocidade de varredura a laser (V), tipo do laser, comprimento de onda do laser, perfil do feixe, geometria do substrato, tamanho de partícula, tensão superficial, alimentação do pó (LIU et al., 2021); (WENG; CHEN; YU, 2014).

Weng et al., (2014) realizaram um estudo que se dedicou a investigar as propriedades microestruturais e mecânicas dos revestimentos, bem como as aplicações do revestimento a laser em ligas de titânio. A pesquisa realizada pelos autores evidenciou que o desempenho do revestimento a laser é influenciado por diversos fatores, tais como o tipo de pó de revestimento empregado, a potência do laser, a velocidade de varredura utilizada e as características da atmosfera durante o processo.

Outro fator importante é a densidade de energia ou fluência, que é considerada um indicador da quantidade de energia transferida através de um feixe de laser durante o processo de

irradiação, sendo responsável pelo aquecimento/fusão da superfície do substrato e do material do revestimento (EMAMIAN; CORBIN; KHAJEPOUR, 2010). Em outras palavras, a fluência é a quantidade de energia que é transmitida através de uma unidade de área em um determinado intervalo de tempo.

Para um feixe com perfil gaussiano, a densidade de energia é definida pelo produto da irradiância pelo tempo de interação do feixe na superfície do substrato, (SANTOS, 2017) conforme a Eq. (3.1).

$$E = \frac{2P_{tot}}{\pi w^2} \times t_i \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Onde E = densidade de energia, t_i = tempo de interação, P_{tot} =potência total do laser e w = raio do feixe do laser

O tempo de interação do feixe laser é de acordo com a Eq. (3.2):

$$t_i = \frac{2w}{v_d} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Onde v_d = velocidade de varredura do feixe

Portanto, a densidade de energia (J/mm^2) é de acordo com a Eq. (3.3):

$$E = \frac{4P_{tot}}{\pi w v_d} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

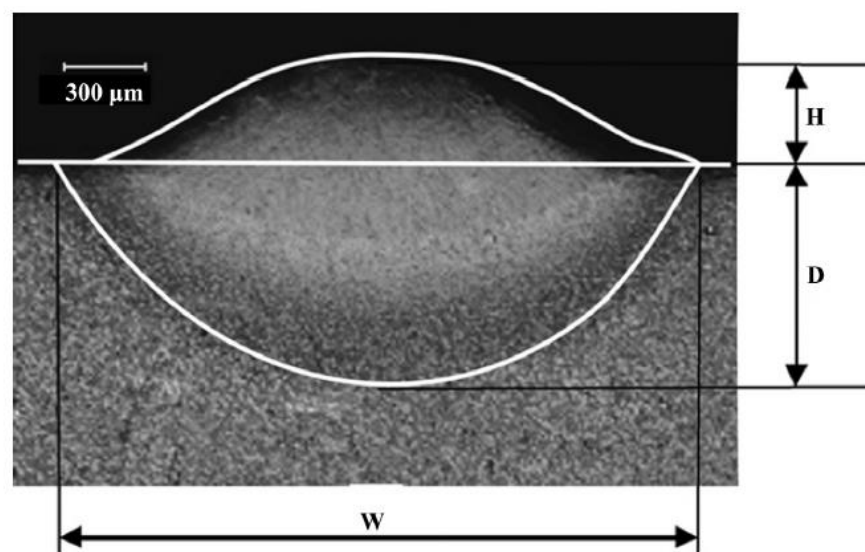
Consequentemente, o emprego de uma maior velocidade de varredura do feixe gera em uma menor fluência. No entanto, as microestruturas dos revestimentos podem ser diferentes para uma densidade de energia constante. Uma elevada velocidade de varredura produz uma maior taxa de resfriamento e consequentemente uma microestrutura mais fina (LIU et al., 2014; WENG; CHEN; YU, 2014)

Em estudos recentes, a fluência tem sido um parâmetro importante no desenvolvimento de novos materiais e processos via laser. Em um estudo realizado por Liu et al. (2020), foi investigada a influência da fluência na formação de grãos durante o processamento a laser. Foi observado que a formação de grãos diminui com o aumento da fluência, devido à maior taxa de fusão e ressolidificação do material.

A diluição é outro fator que influencia a qualidade do revestimento, definida como a

mistura entre o material do substrato e o material adicionado ao revestimento conforme mostra a Figura 3.4. A taxa de diluição (d) é definida como a razão entre a profundidade do revestimento (D) e a soma da altura do revestimento (H) e (D). No processo de laser cladding, a taxa de diluição é limitada em torno de 10%, enquanto no processo de laser surface alloying a taxa é acima de 10% (SIDDIQUI et al. 2021). De um modo geral, quanto maior a potência do laser empregado, maior é a diluição. A diluição também está relacionada com a velocidade de varredura do feixe, ou seja, quanto maior a velocidade de varredura, menor é a taxa de diluição.

Figura 3.4 - Taxa de diluição

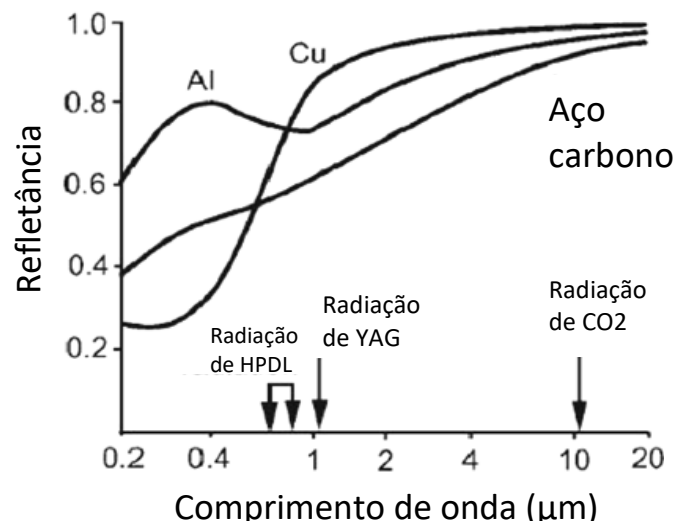


Fonte: (SUN; HAO, 2012)

Já o comprimento de onda da radiação eletromagnética empregado no sistema de laser influencia na absortividade no substrato, conforme mostrado pela Figura 3.5.

A Figura 3.5 evidencia que para uma irradiação com um laser de CO₂, comprimento de onda de 10,6 μm, em substratos de aços em geral, a refletância é da ordem de 90%. Com isso, materiais com baixa absortividade são processados com lasers de baixo comprimento de onda.

Figura 3.5 - Refletância para materiais metálicos em função da radiação eletromagnética



Fonte: (PINKERTON; LI, 2004) adaptado.

Uma alternativa para tratamento via laser de elevado comprimento de onda é o emprego de um revestimento absorvente aplicado à superfície do substrato para evitar a perda de energia por reflexão, tais como: dissulfeto de molibdênio, grafite, negro de fumo (*carbon black*) (STEEN; MAZUMDER, 2010).

Nesta dissertação é empregado o negro de fumo como material foto absorvedor de radiação, que conforme Vasconcelos et al. (2012) pode ser obtido por pirólise ou pela combustão parcial de hidrocarbonetos, gases ou líquidos.

Além da atuação como material foto absorvedor, o carbono presente no negro de fumo é introduzido na superfície do substrato devido ao processo de difusão no estado sólido durante a irradiação via laser; esse processo conhecido como cementação via laser também eleva a dureza superficial do substrato (OLIVEIRA, 2014).

No trabalho Vasconcelos et al., (2010) foi aplicado o revestimento de negro de fumo como material foto absorvedor. A dureza superficial do substrato de aço SAE 4340 antes da irradiação via laser de 250 HV_{0,05} foi incrementada para 870 HV_{0,05}. O trabalho mostrou a indicação de quatro zonas na seção reta da amostra após a irradiação via laser, citadas como: revestimento de negro de fumo, zona de difusão de carbono, zona endurecida e substrato. Também foi observado que a concentração de carbono foi reduzida a partir do revestimento de negro de fumo até a zona do substrato. Este fato evidencia que além do tratamento térmico de endurecimento, ocorreu a difusão do carbono no substrato.

No trabalho de Moradi, et al., (2019) foi utilizado o revestimento de negro de fumo para endurecimento superficial de um aço AISI 4130 via laser de diodo, com comprimento de onda de 808nm. Foi comparada a dureza superficial em amostras irradiadas diretamente sobre o substrato e amostras com o revestimento foto absorvedor. Os resultados mostraram que a dureza Vickers foi de 762 HV para as amostras revestidas com carbono e de 707 HV para as amostras sem o revestimento. Esses números indicam a eficácia do uso de revestimento de carbono. A absorção do laser é aumentada pelo pó de negro de fumo, que ocasiona uma maior transferência de calor para o substrato, atingindo temperaturas maiores e em razão da formação da martensita, a dureza é aumentada. O trabalho também comparou com o método de endurecimento via forno, no qual a dureza encontrada foi de 572 HV para resfriamento em óleo. Um maior nível de ferrita não dissolvida foi encontrada na amostra endurecida em forno tradicional em comparação com a amostra endurecida via laser.

3.4 Propriedades do aço AISI 304

O aço AISI 304 é um dos materiais mais amplamente utilizados na indústria. Podem ser empregados como equipamentos alimentícios, farmacêuticos, mineração, painéis decorativos, talheres, panelas, entre outros. A razão está em sua boa resistência à corrosão, como também na soldabilidade, conformabilidade, tenacidade e ductilidade (VAZ Jr. et al., 2019) (NAEEM et al., 2019)

O aço AISI 304 é um aço inoxidável austenítico, contendo cromo e níquel em sua composição, o que lhe confere uma alta resistência à corrosão e oxidação (BANSOD, 2016), também apresenta boa resistência à oxidação em altas temperaturas, o que o torna adequado para aplicações em ambientes de alta temperatura. De acordo com Schino & Kenny, (2002), a resistência à oxidação do aço AISI 304 é influenciada pela composição química, pelo tamanho de grão e pela presença de inclusões.

4. METODOLOGIA

Neste tópico, serão descritos os materiais e procedimentos para a irradiação de laser sobre o substrato de aço inox 304 recobertos com negro de fumo como também as técnicas de caracterizações empregadas no trabalho.

4.1 Preparação das Amostras

Para desenvolvimento do trabalho foi empregado o aço inoxidável AISI 304, adquirido comercialmente. As amostras foram usinadas em pastilhas de 5 mm de espessura e 25,5 mm de diâmetro. Após o processo de usinagem, as amostras foram lixadas com lixas de granulometria de 80, 220, 320, 600 e 2000 e logo em seguida polidas, usando alumina com granulometria de 1,0 μm e 0,05 μm .

De acordo com o estudo de Zhu et al. (2020), a etapa de polimento melhora a qualidade da superfície, reduz a rugosidade e garante uma superfície plana e uniforme. Além disso, o polimento remove camadas superficiais de contaminação e oxidação. Já o lixamento é importante para remover camadas mais espessas de material e deixar a superfície uniforme para o polimento.

4.2 Processo de Irradiação via Laser

O processo de irradiação via laser foi realizado na EMC/UFG nas dependências do Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação.

Os principais parâmetros do laser são:

- Potência de saída igual a 100 W;
- Potência de saída empregada no trabalho: 70-80 W;
- Diâmetro do feixe de 300 μm ;
- Comprimento de onda de 10,6 μm ;

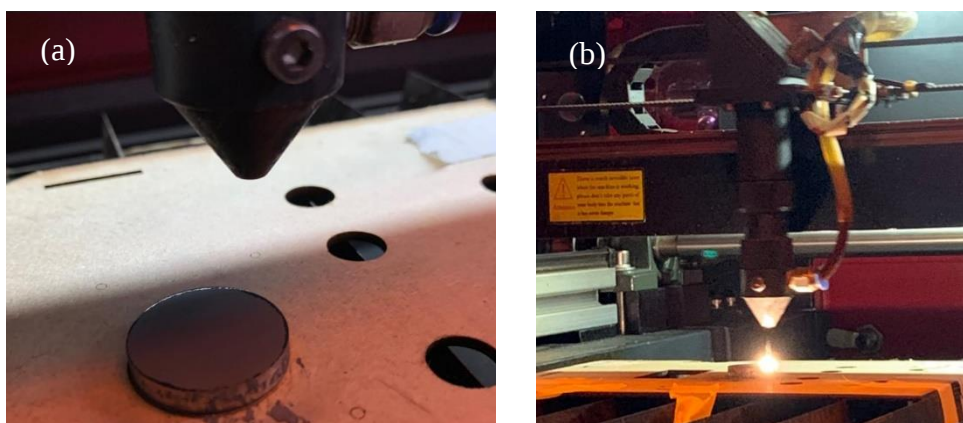
Os principais parâmetros de irradiação do laser são:

- Resolução: Número de pontos por polegada quadrada (ppi). Cada ponto tem o diâmetro do laser. A taxa de sobreposição dos pontos do laser é controlada com a variação da resolução. A sobreposição dos pontos permite uma variação da energia ofertada ao sistema;

- Velocidade de varredura do feixe: A velocidade de varredura indica o tempo de irradiação em cada ponto. Para uma resolução constante, uma diminuição da velocidade de varredura do feixe, o tempo de aplicação para cada ponto aumenta;
- Número de Ciclos de Aquecimento (NCA): Define o número de vezes que uma região é irradiada pelo feixe do laser.

O método de aplicação do pó de negro de fumo foi a pré-deposição foi feita pelo método de imersão, que consiste na imersão da amostra, com o auxílio de uma pinça anatômica em uma solução contendo 15 g de negro de fumo e 100 ml álcool etílico 92,8 %. Em seguida, após a secagem, é feita sua irradiação com o feixe de laser. A Figura 4.1 (a) mostra o substrato recoberto com o negro de fumo e em (b) o processo de irradiação do feixe de laser sobre o substrato recoberto com negro de fumo. O pó de negro de fumo possui partícula de dimensão nanométrica (VASCONCELOS; C.; N., 2012) e foi doado pelo Laboratório de Desenvolvimento de Aplicações de Lasers e Óptica (DedALO) do Instituto de Estudos Avançados (IEAv).

Figura 4.1 - (a) Substrato recoberto com negro de fumo, (b) processo de irradiação via laser



Fonte: Produzido pelo autor

Para a seleção de parâmetros do laser, foi elaborada uma carta de processo em um substrato, contendo 13 retângulos com área de 15 mm², no qual foram variados os parâmetros de velocidade de varredura do feixe, densidade de energia e resolução. A Tabela 4.1 mostra os parâmetros da carta de processo.

Tabela 4.1 – Carta de Processo

Retângulos	Velocidade (mm/s)	Resolução (ppp)	Número de ciclos de aquecimento	Densidade da energia (J/mm ²)
01	80	2540	1	8,49
02	80	847	1	8,49
03	80	423	1	8,49
04	80	282	1	8,49
05	60	2540	1	11,32
06	60	847	1	11,32
07	60	423	1	11,32
08	60	282	1	11,32
09	60	212	1	11,32
10	40	2540	1	16,98
11	40	847	1	16,98
12	40	423	1	16,98
13	40	282	1	16,98

Fonte: Produzido pelo autor

A Tabela 4.2 mostra os parâmetros escolhidos para a irradiação na área completa do substrato.

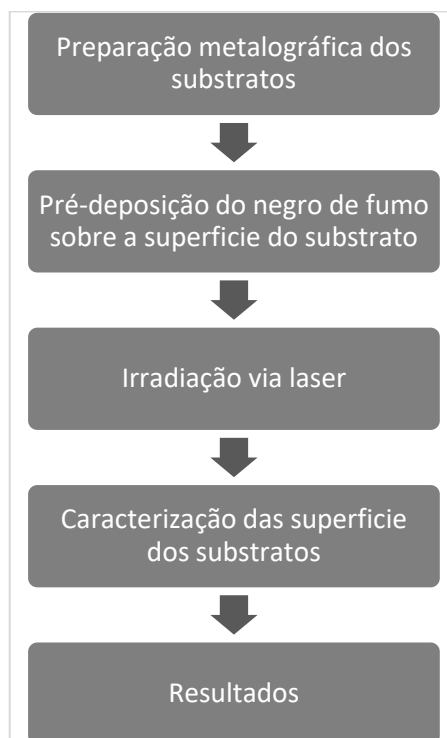
Tabela 4.2 – Parâmetros escolhidos

Substrato	Retângulo	Velocidade (mm/s)	Resolução (ppp)	Número de ciclos de aquecimento	Densidade da energia (J/mm ²)
1	2	80	850	1	8,49
2	4	80	300	1	8,49
3	7	60	400	1	11,32

Fonte: Produzido pelo autor

A Tabela 4.3 mostra o fluxograma das etapas do trabalho, desde a preparação de amostras, que inclui as etapas de corte, lixamento, polimento; pré-deposição do material foto absorvedor; irradiação via laser com a definição da carta de processo; caracterização do substrato após a irradiação via laser e os resultados.

Tabela 4.3 – Fluxograma das etapas do trabalho



Fonte: Produzido pelo autor

4.3 Técnicas de Caracterização

As imagens de Microscopia Ótica (MO) foram usadas para examinar as morfologias das superfícies dos substratos após o processo de irradiação via laser. As imagens foram realizadas nos microscópios ZEISS Axio Imager M2 e ZEISS Stereo Discovery V.8 pertencentes ao Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF) da EMC/UFG.

As análises de microdureza Vickers (HV) foram realizadas com microdurômetro de Marca Mitutoyo modelo HM-200 localizado no Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF). Os parâmetros para a análise na superfície da amostra foram: 50 gf de carga e 10 s de duração; já na seção transversal da amostra, 10 gf de carga e 10 s de duração.

As imagens MEV do escaneamento em linha (linescan) foram obtidas em um equipamento da marca Jeol JSM IT300LV com tensão de aceleração de elétrons de 5 kV no modo de detecção de elétrons secundários (SE) pertencente ao Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI).

As imagens MEV com EDS foram realizadas através de um equipamento da marca

TESCAN, modelo MIRA-3 de energia (EDS) pertencente ao Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

As medidas de coeficiente de atrito dos substratos foram realizadas em um tribometro da Anton Paar, modelo TRB³, localizado na Anton Paar Brasil. Os parâmetros usados foram: modo linear, amplitude total de 6 mm, velocidade máxima linear de 50 mm/s, carga de 5 N, condição de 5000 ciclos e uma repetição.

5. RESULTADOS

5.1 Resultados e discussão

A Figura 5.1 mostra o substrato com os treze retângulos da carta de processo. É possível identificar a diferença de morfologia das superfícies dos retângulos.

Figura 5.1 – Fotografia da superfície do substrato com a carta de processo.



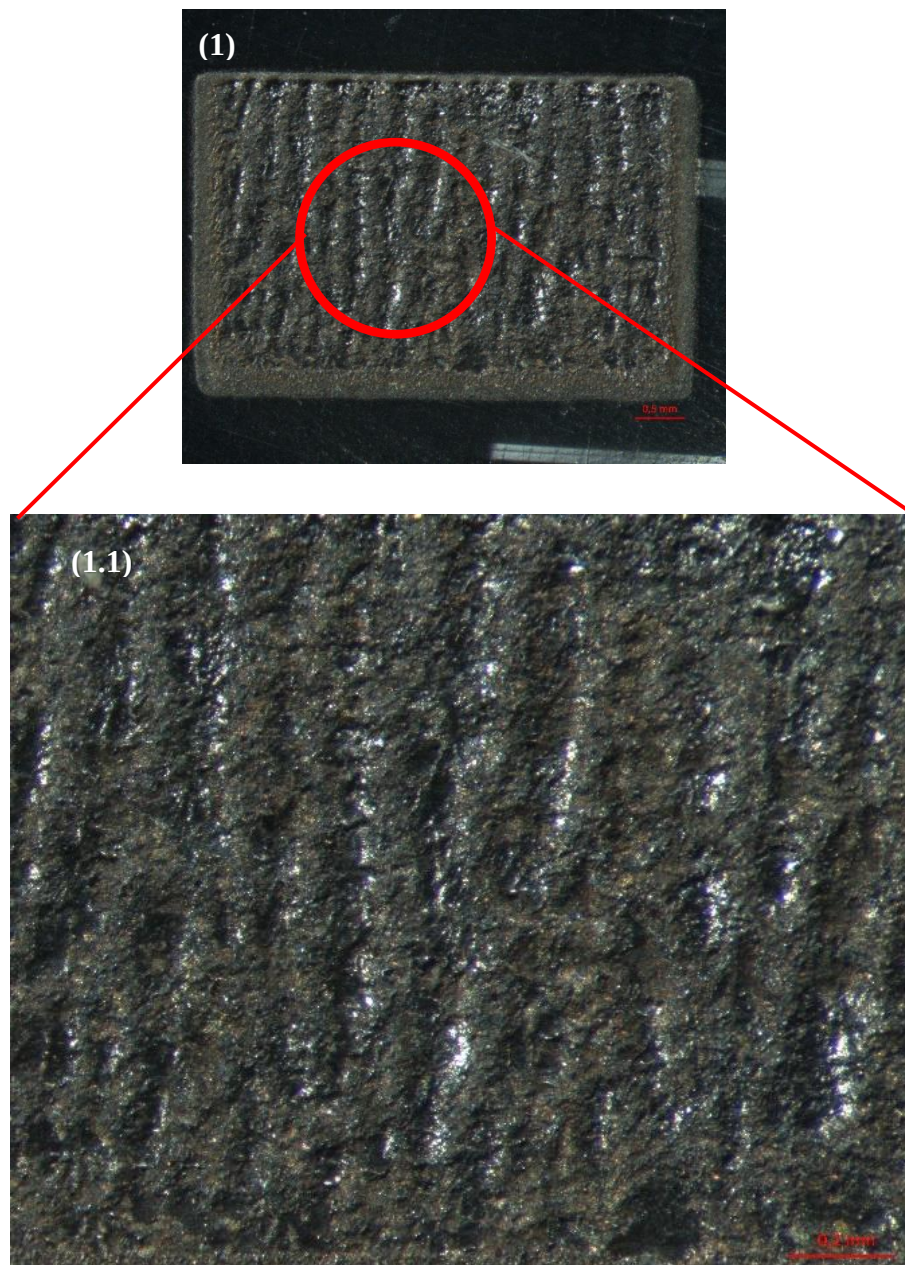
Fonte: Produzido pelo autor

A Figura 5.2 mostra a imagem MO do topo dos retângulos da carta de processo. Para cada retângulo, tem-se uma imagem em maior magnificação da superfície. Observa-se que a alteração da resolução, para um grupo com densidade de energia constante, leva a uma modificação na morfologia da superfície, Figuras 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3 e 5.2.4. A resolução é definida como pontos por polegada quadrado; a área do ponto é o diâmetro do feixe do laser, no caso, 300 μm . Caso a resolução fosse de 85 ppi, cada ponto estaria adjacente ao ponto ao lado; resoluções acima de 85 ppi levam a sobreposição do feixe do laser durante a varredura.

Consequentemente, quanto maior a resolução, maior será a sobreposição do feixe, como também maior a densidade de energia total transferida para a superfície do substrato. Isto pode ser visto pelas imagens em elevada resolução, Figuras 5.2.1, 5.2.5 e 5.2.10. Nota-se que ocorreu o processo de refusão superficial, com aumento da magnitude para o substrato com menor velocidade de varredura, figura 5.2.10. No entanto, o processo de refusão leva ao aumento da

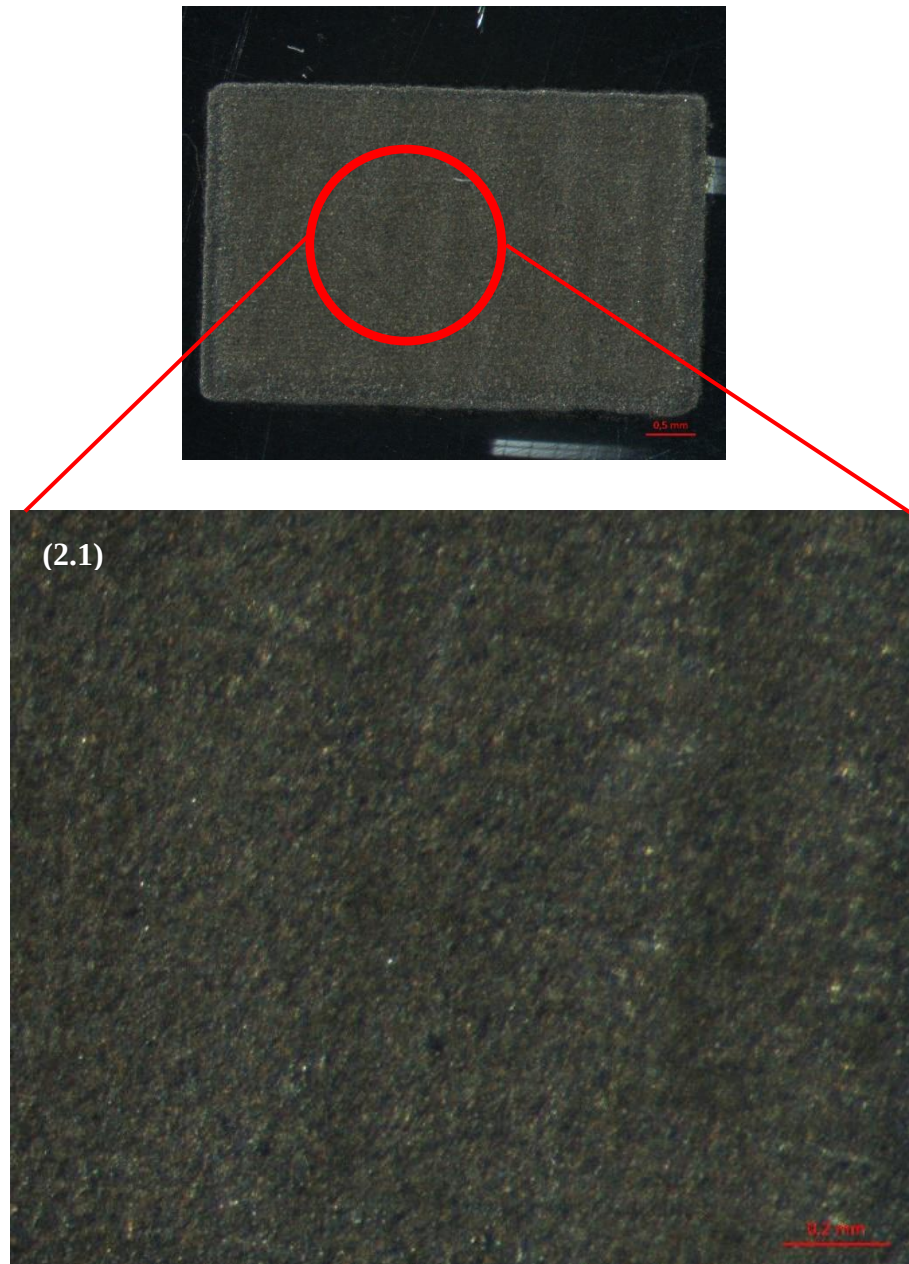
rugosidade superficial, como também o aparecimento de trincas; não sendo indicado para aplicações industriais(MORADI; KARAMI MOGHADAM; KAZAZI, 2019).

Figura 5.2.1 – Micrografia da superfície do retângulo 1. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.



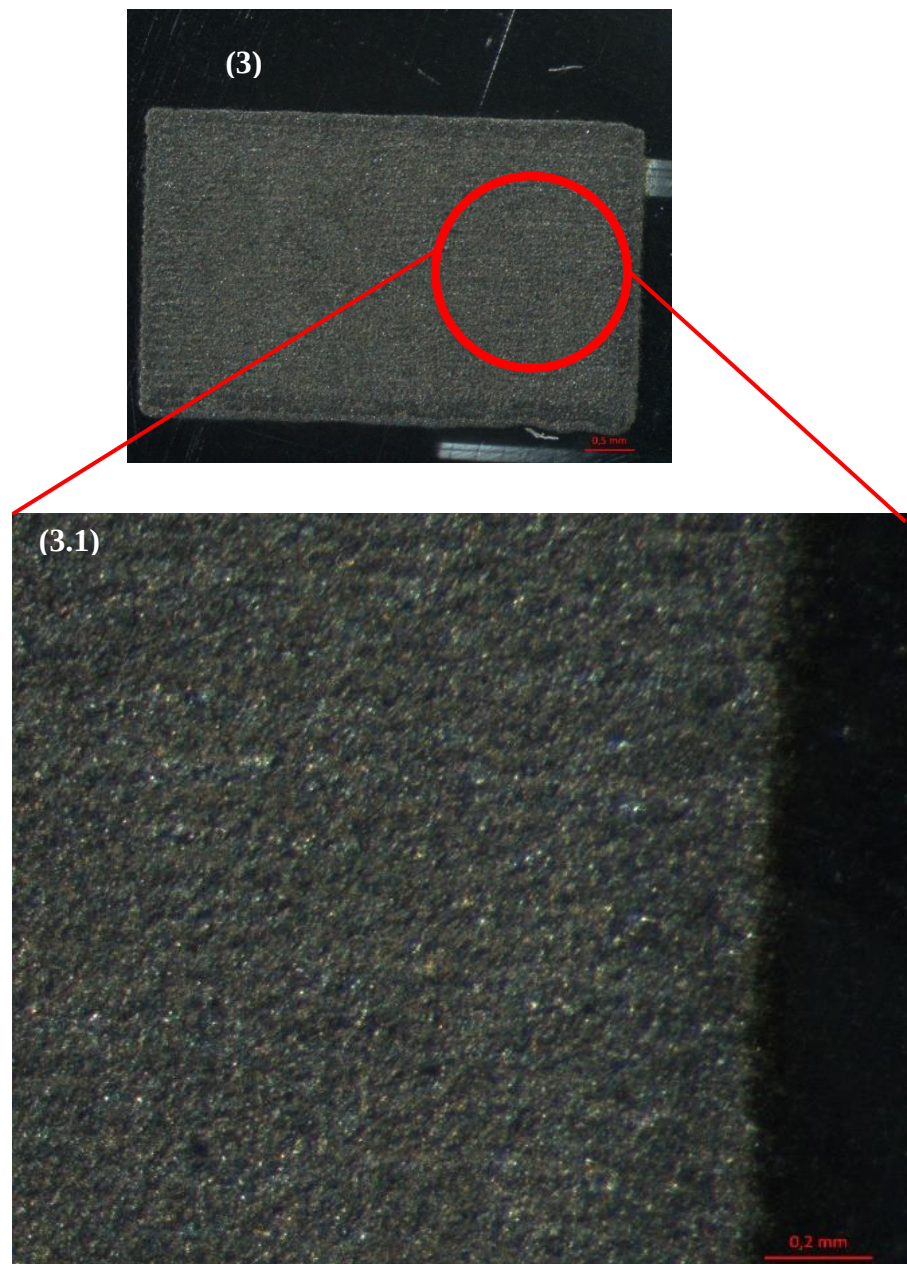
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 5.2.2 – Micrografia da superfície do retângulo 2. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação



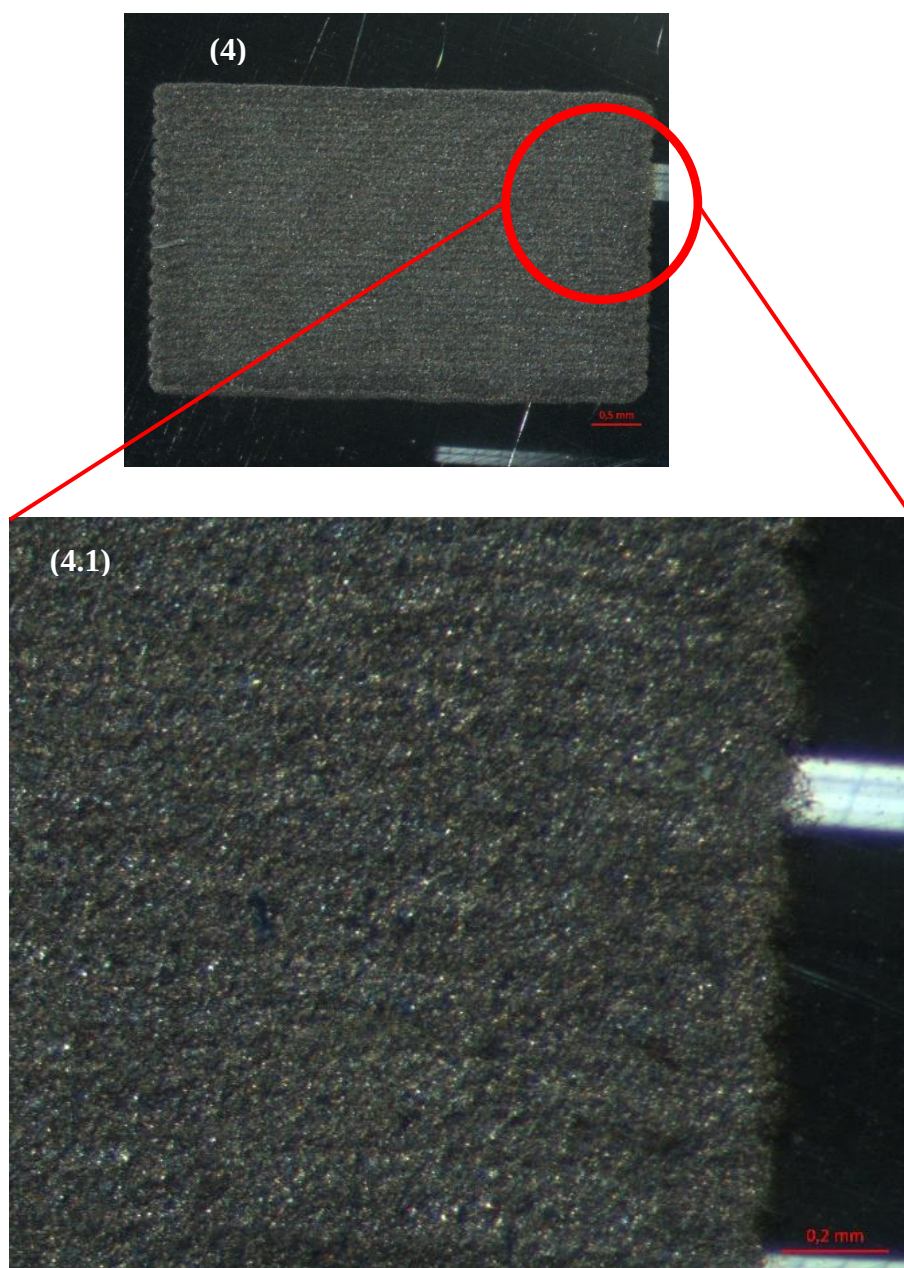
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 5.2.3 – Micrografia da superfície do retângulo 3. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.



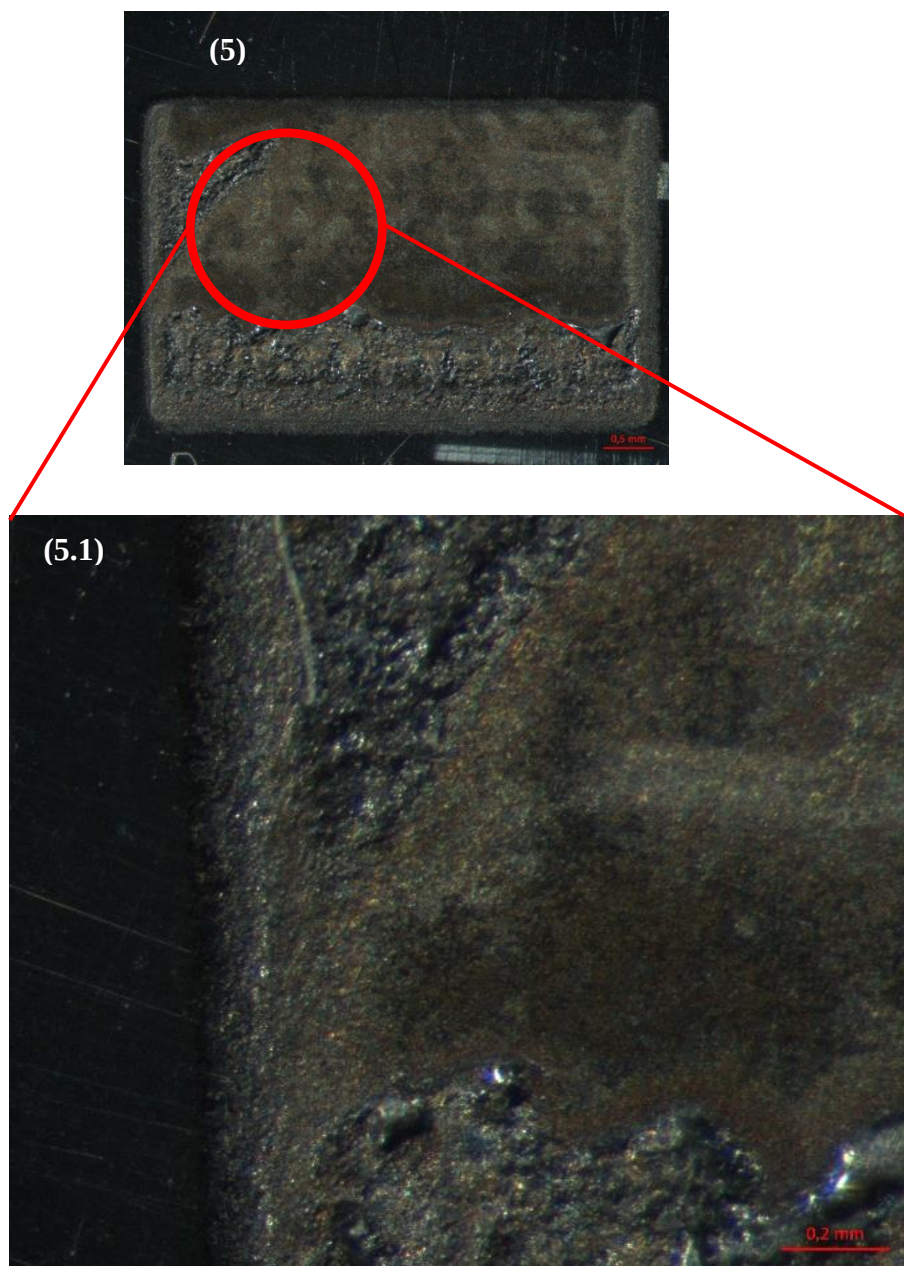
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 5.2.4 – Micrografia da superfície do retângulo 4. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.



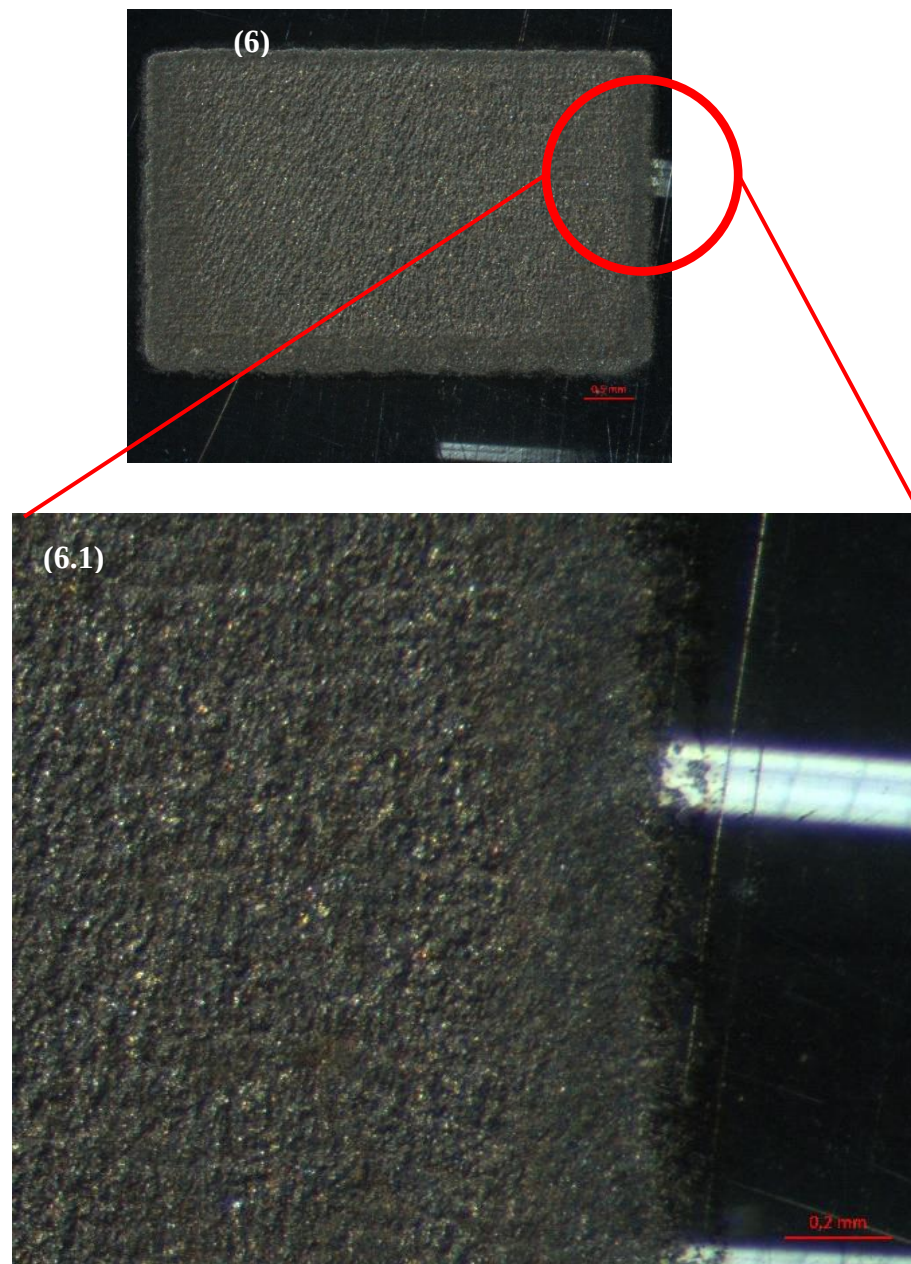
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 5.2.5 – Micrografia da superfície do retângulo 5. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.



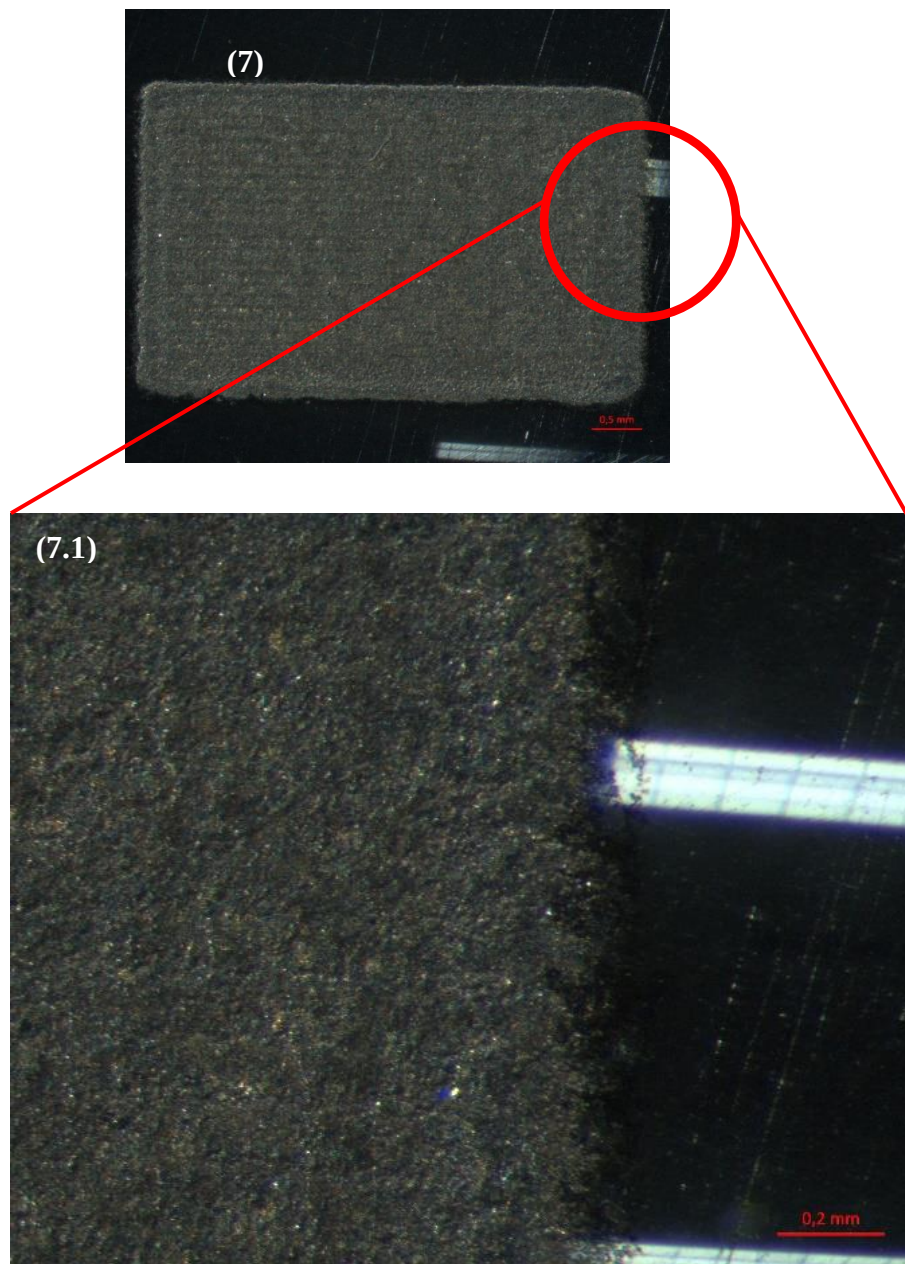
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 5.2.6 – Micrografia da superfície do retângulo 6. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.



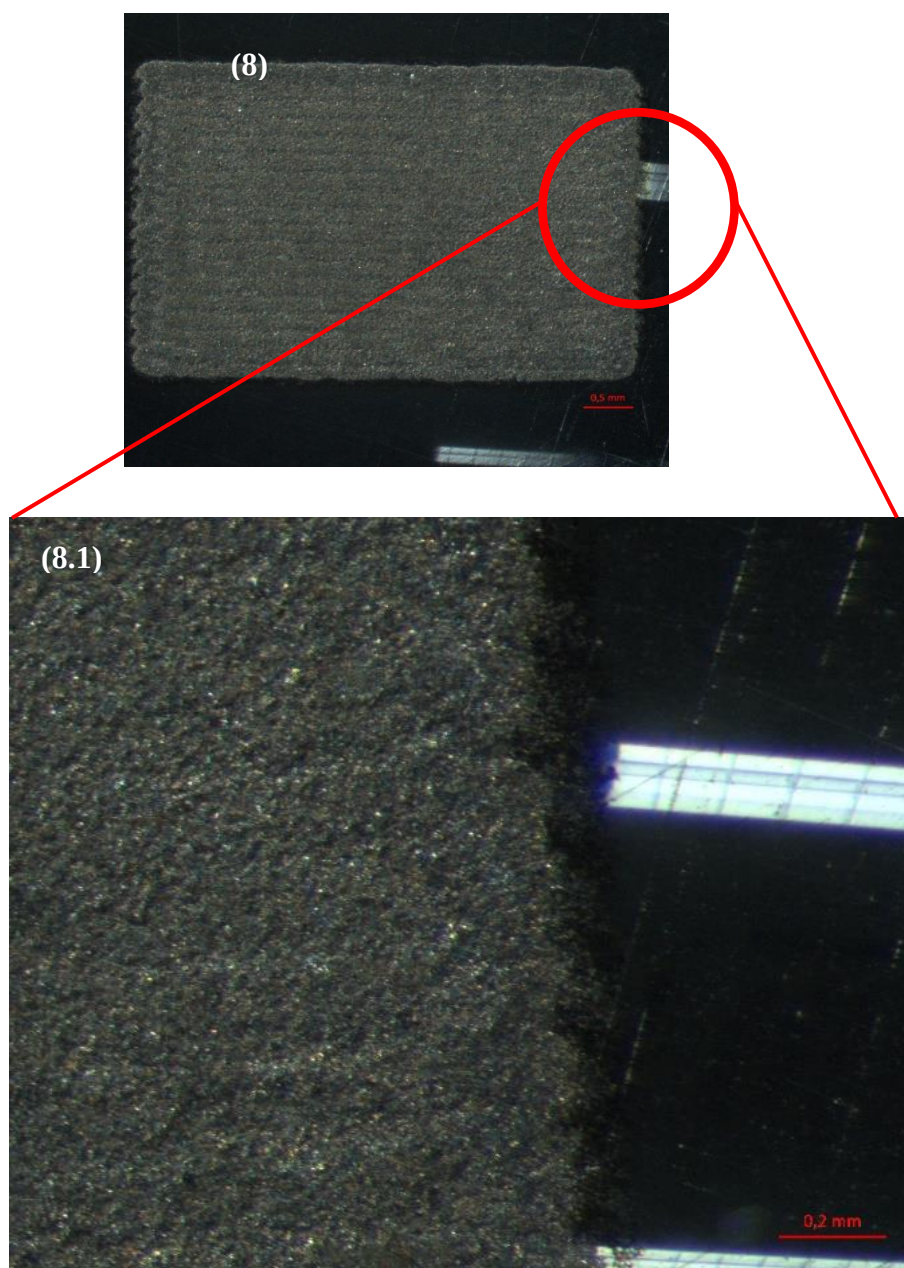
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 5.2.7 – Micrografia da superfície do retângulo 7. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.



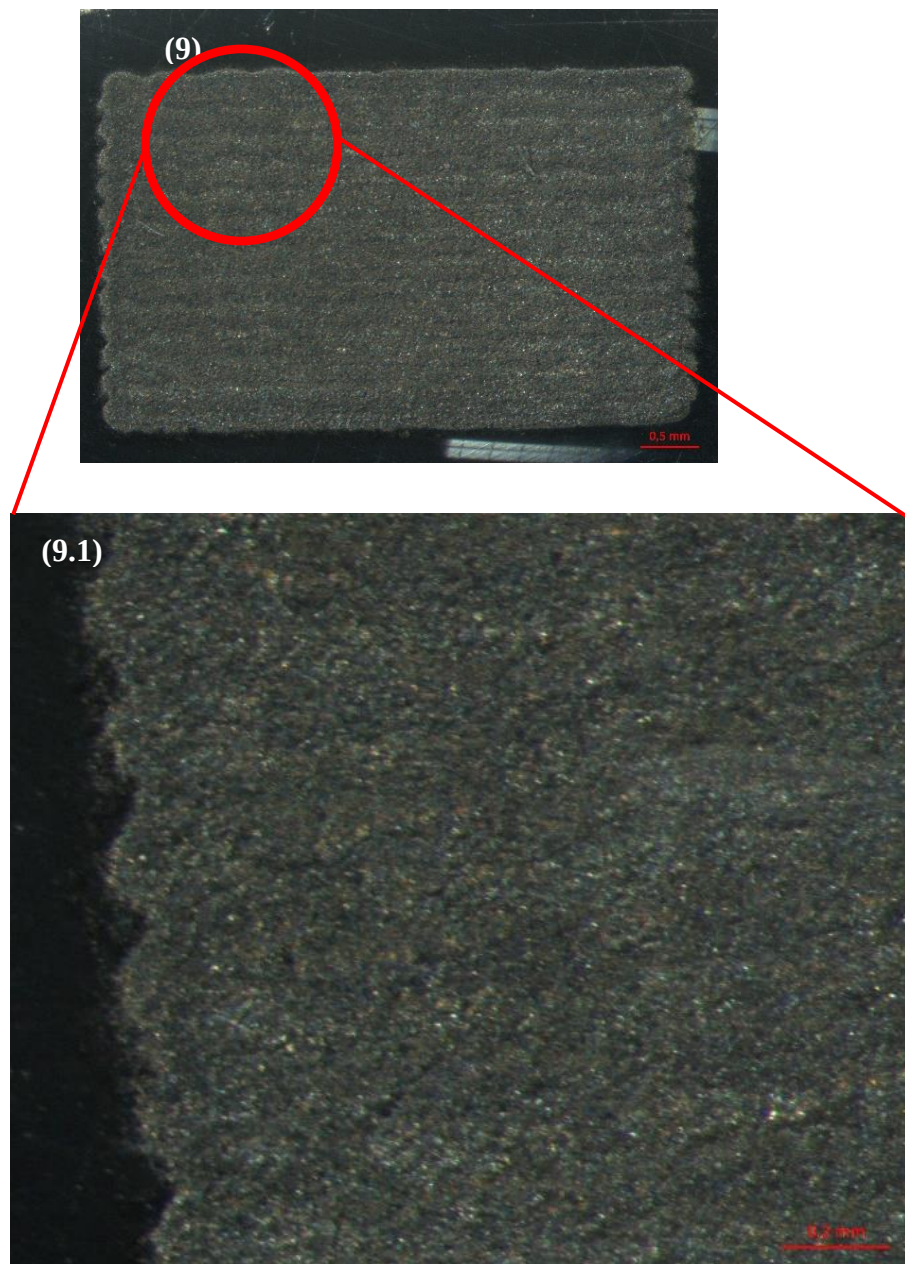
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 5.2.8 – Micrografia da superfície do retângulo 8. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.



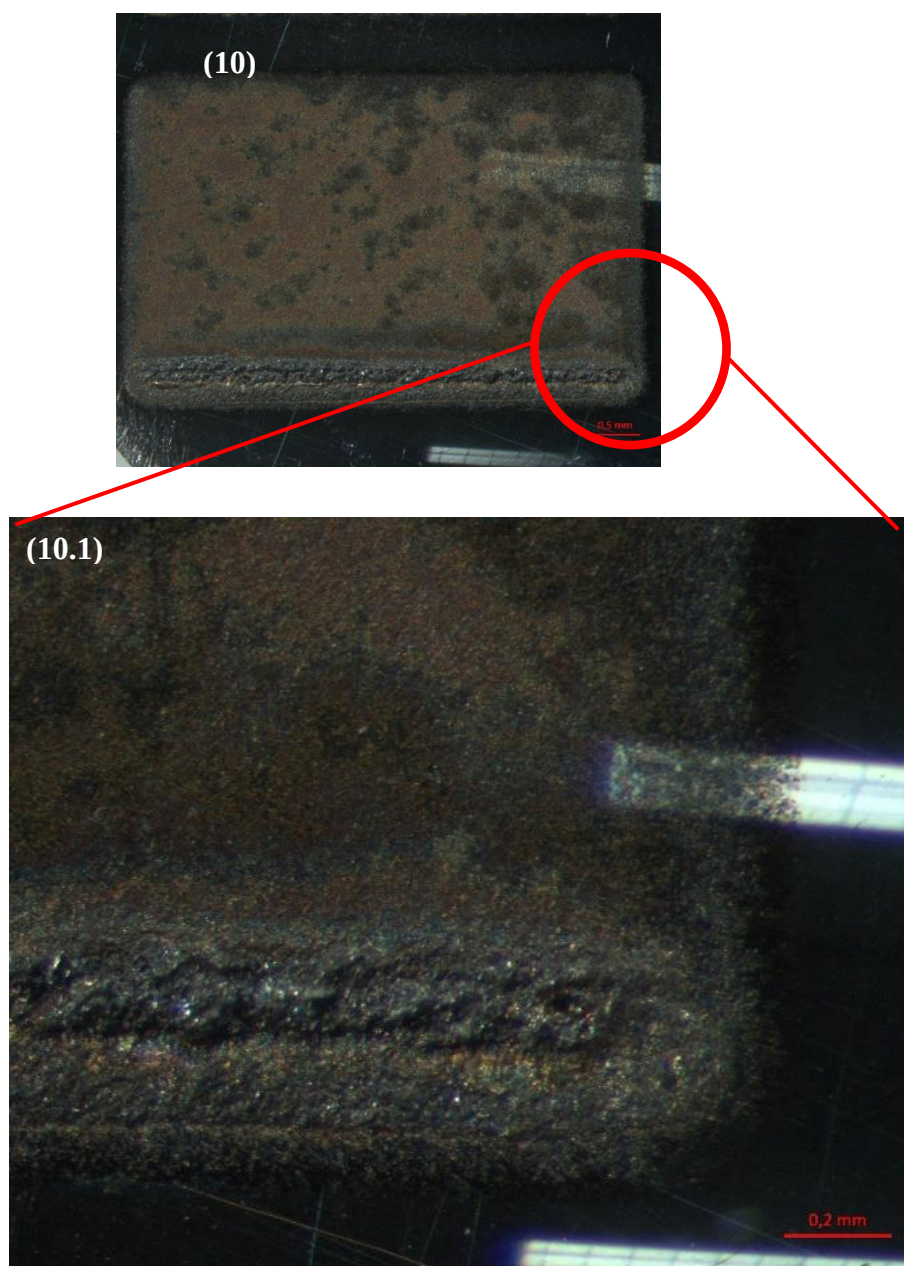
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 5.2.9 – Micrografia da superfície do retângulo 9. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.



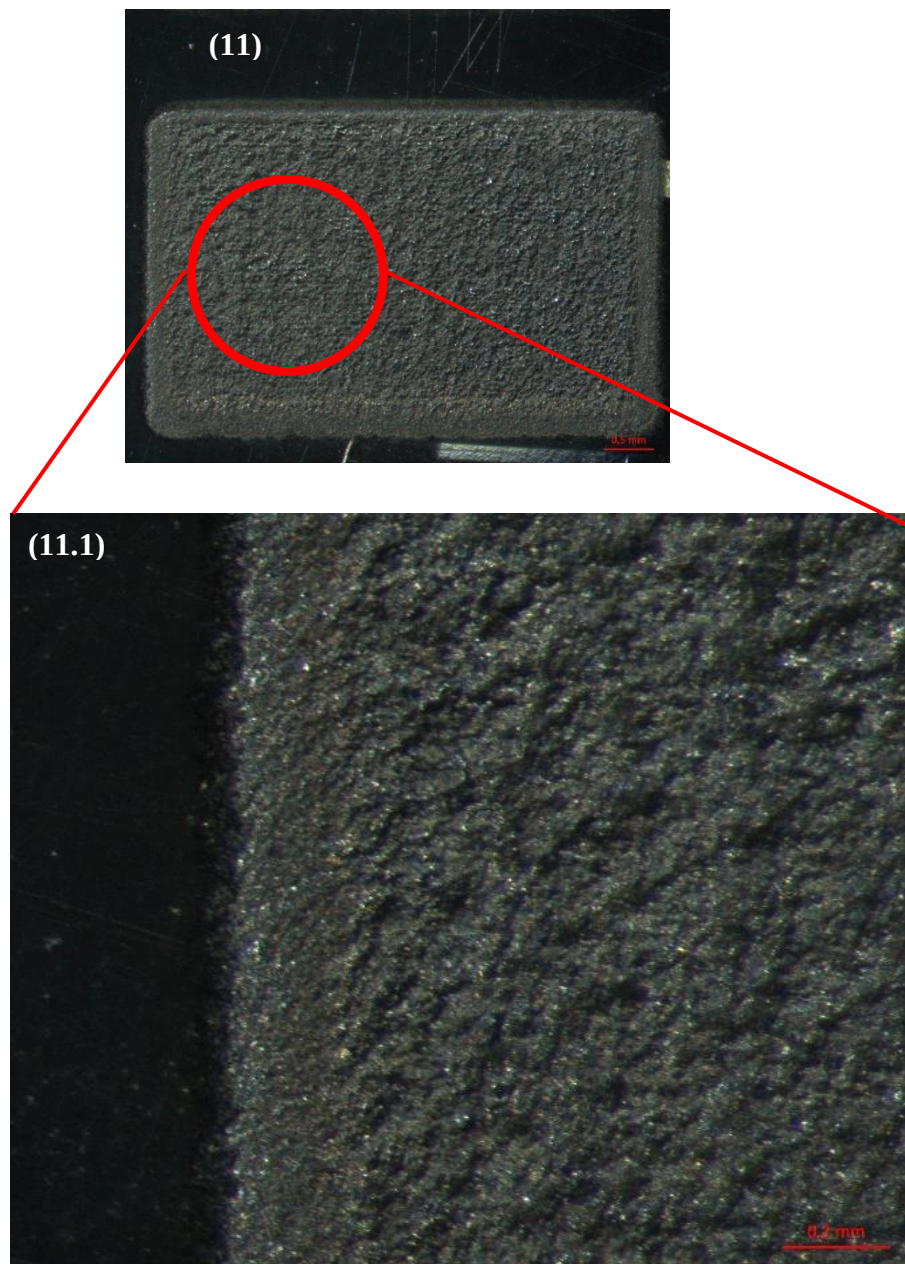
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 5.2.10 – Micrografia da superfície do retângulo 10. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.



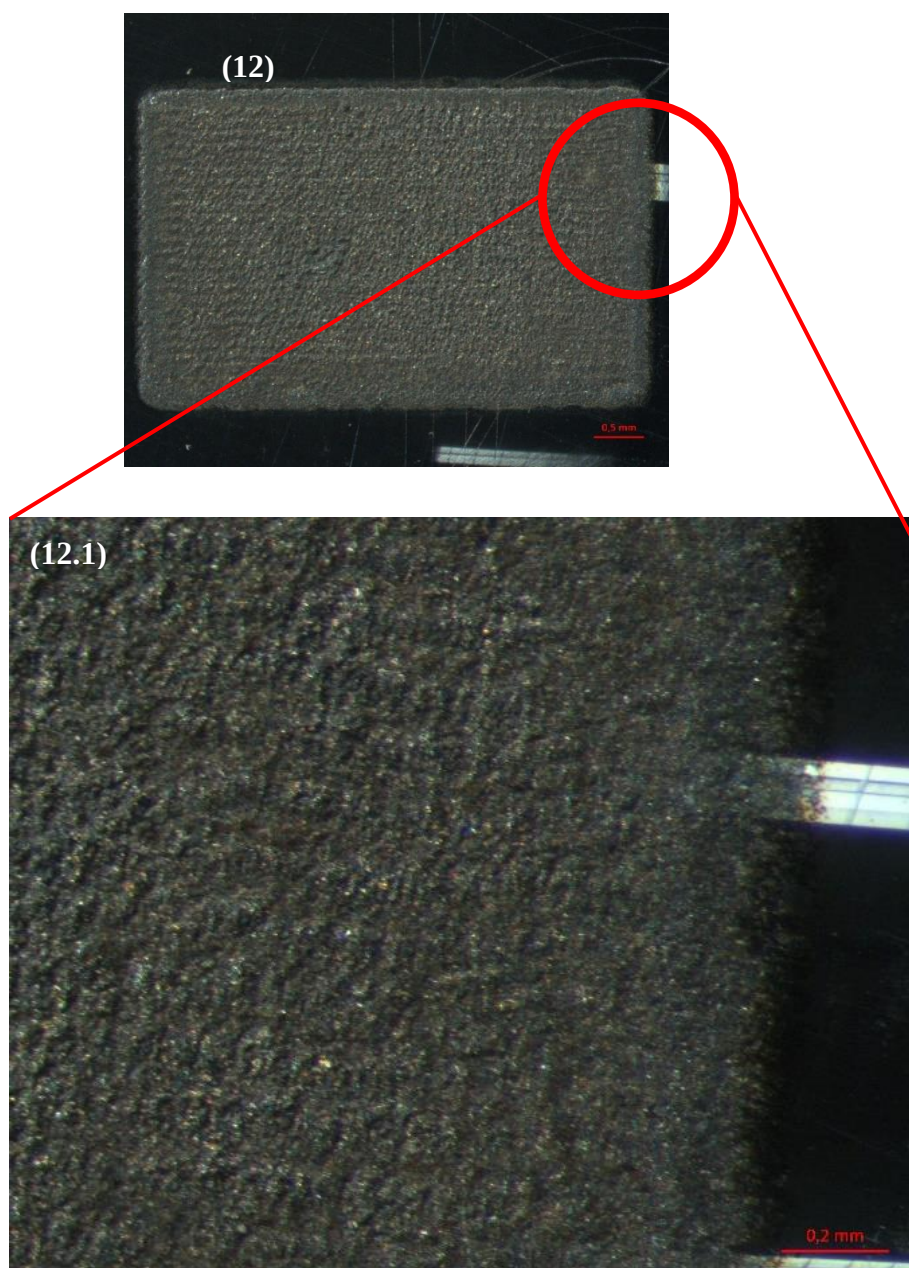
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 5.2.11 – Micrografia da superfície do retângulo 11. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.



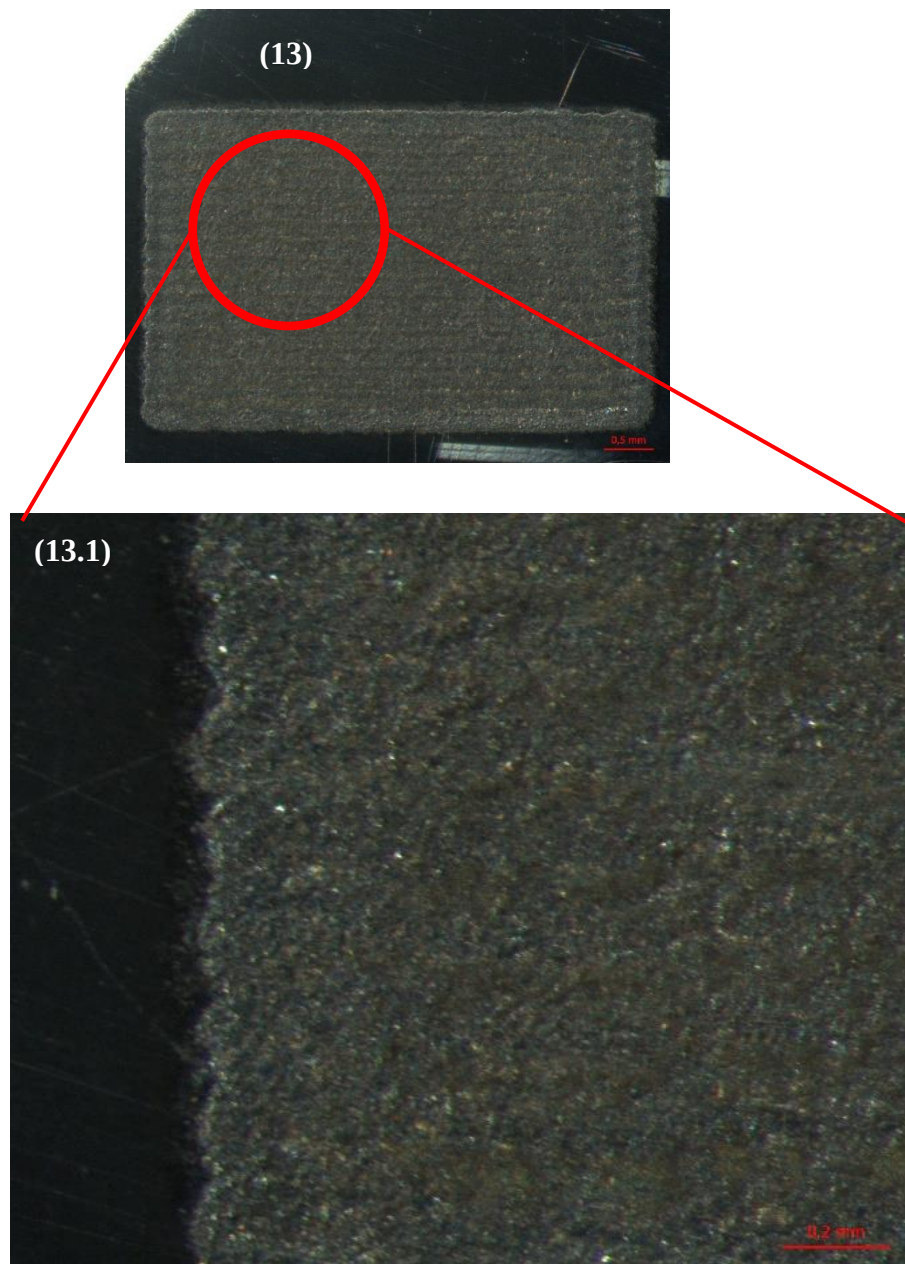
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 5.2.12 – Micrografia da superfície do retângulo 12. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 5.2.13 – Micrografia da superfície do retângulo 13. A nomenclatura .1 corresponde as micrografias em maior magnificação.



Fonte: Produzido pelo autor

Além do fator da resolução, a velocidade de varredura do feixe influencia na densidade de energia, sendo quanto maior a velocidade de varredura menor a densidade de energia. As Figuras 5.2.2, 5.2.6 e 5.2.11 possuem a mesma resolução, mas velocidades decrescentes.

Os retângulos 2, 4 e 7 foram escolhidos em termos da ausência de trincas superficiais e refusão, para a irradiação total da área da amostra.

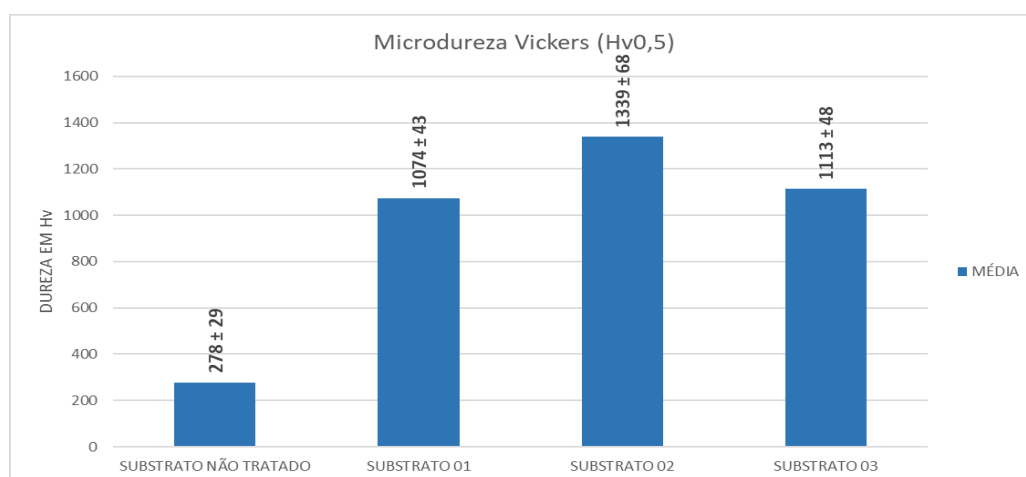
As microdurezas dos substratos com a variação dos parâmetros selecionados da Tabela

4.2, são apresentados na Figura 5.3. É evidente o aumento de microdureza superficial do substrato irradiado via laser quando comparado com o substrato sem o revestimento, fato que mostra a aplicabilidade de um laser de baixo custo para aumento de dureza superficial, como também a eficácia do emprego do negro de fumo. No trabalho Mahmoud (2015) a dureza do substrato de aço inox 304 revestido com carbeto de titânio alcançou valores de 2000 HV₁.

No trabalho de Seleka et. al., (2007) foi empregado o tratamento de fusão via laser em um aço inox 304 sem o emprego do negro de fumo. Os resultados mostraram que não ocorreram alterações da dureza Vickers quando comparado com o substrato base, apesar do refinamento da estrutura. Por outro lado, a resistência a corrosão por pites foi aumentada.

O aumento da dureza superficial é um indicativo do possível incremento do teor de carbono na superficial no aço inox 304, via difusão do negro de fumo, já que o aço inox 304 não endurece por tratamento térmico. No substrato sem tratamento, a microdureza média foi de 278,07 Hv_{0,5} enquanto nos substratos tratados via laser, a microdureza média foi acima de 1000 Hv_{0,5}. A Tabela 5.1 mostra o aumento da dureza superficial quando comparada com o substrato sem tratamento via laser, no entanto, o valor da microdureza não foi constante ao longo da área irradiada.

Figura 5.3 – Microdureza Vickers dos substratos antes e após a irradiação via laser



Fonte: Produzido pelo autor

Tabela 5.1 – Média de aumento de microdureza Vickers nas superfícies dos substratos.

Amostra	1	2	3	Média	Aumento
Sem tratamento	239,7	309,3	285,2	278	0
Substrato 01	1014	1095	1112	1074	386%
Substrato 02	1387	1243	1388	1339	482%
Substrato 03	1045	1151	1143	1113	400%

Fonte: Produzido pelo autor

Nos substratos 01, 02 e 03 foram analisados o perfil de microdureza na seção transversal das amostras, conforme exemplificado pela Figura 5.4.

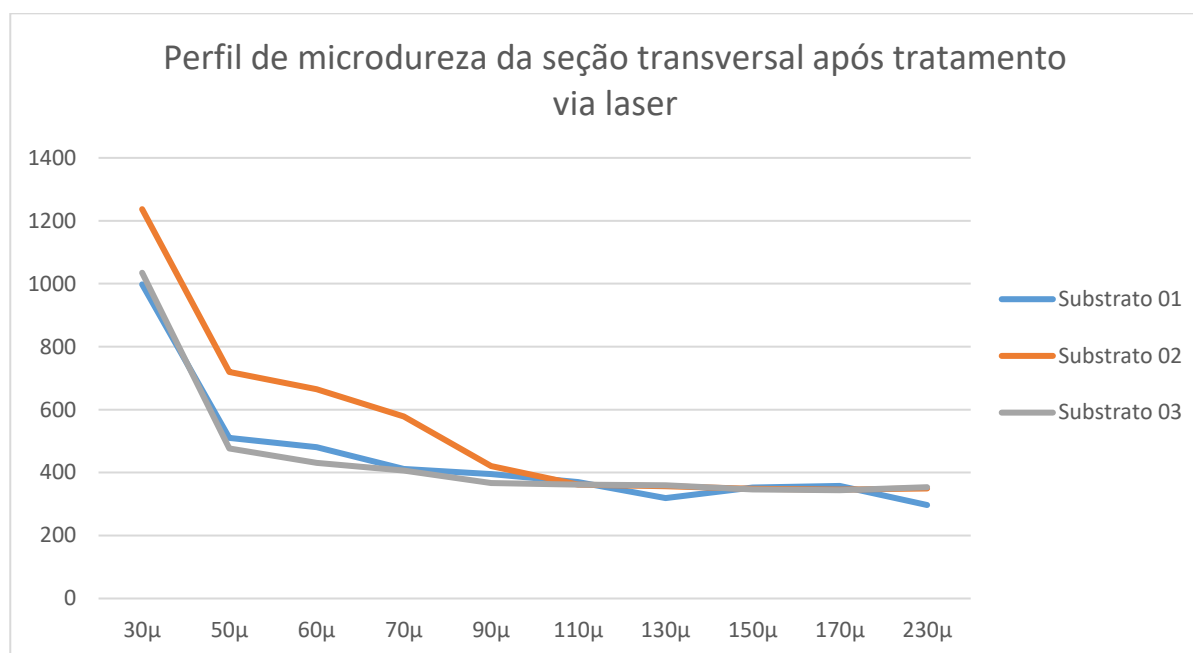
A Figura 5.5 mostra a distribuição da microdureza através da profundidade da zona tratada a laser para os substratos 01, 02 e 03.

Figura 5.4 – Fotografia da seção reta do substrato



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 5.5 – Gráfico de Microdureza $HV_{0,01}$ da seção transversal dos substratos 01 e 02 e 03.



Fonte: Produzido pelo autor

O perfil de microdureza HV da seção transversal mostra um aumento da microdureza na superfície do substrato e diminui gradualmente para o substrato, perfil semelhante ao encontrado no trabalho de (MAHMOUD, 2015) para um aço inox 304 recoberto por carbeto de titânio. Já no trabalho de Abdalla et al., (2015), para um aço 4340 recoberto de negro de fumo, o perfil de microdureza HV apresentou um aumento da microdureza na zona de transição para a zona afetada termicamente, devido a formação de fases duras, tais como bainita e martensita.

Um perfil de microdureza não abrupto evita uma possível fragmentação da superfície da camada endurecida, desempenhando um papel de conexão das propriedades mecânicas entre a camada endurecida e o substrato (LIU; WANG; ZHANG, 2014).

Os substratos 1 e 2, apesar de possuírem a mesma densidade de energia de $8,49 \text{ J/mm}^2$, apresentaram perfis com diferenças significativas em relação a microdureza no interior dos substratos. Como por exemplo, com 50 micrometros de profundidade a partir da superfície, o valor da microdureza Vickers do substrato 2 é de 720 enquanto do substrato 1 é de 510. A diferença dos parâmetros de irradiação dos dois substratos está na resolução. A resolução do substrato 1 é de 850 ppi enquanto do substrato 2 é de 300 ppi. Uma elevada resolução denota em uma alta taxa de sobreposição do feixe, contribuindo então para uma sobreposição da densidade de energia, no entanto, possivelmente essa elevada resolução causou uma ablação do pó

de negro de fumo, diminuindo, por este modo, a concentração de carbono na superfície e consequentemente a difusão do carbono para o interior do substrato.

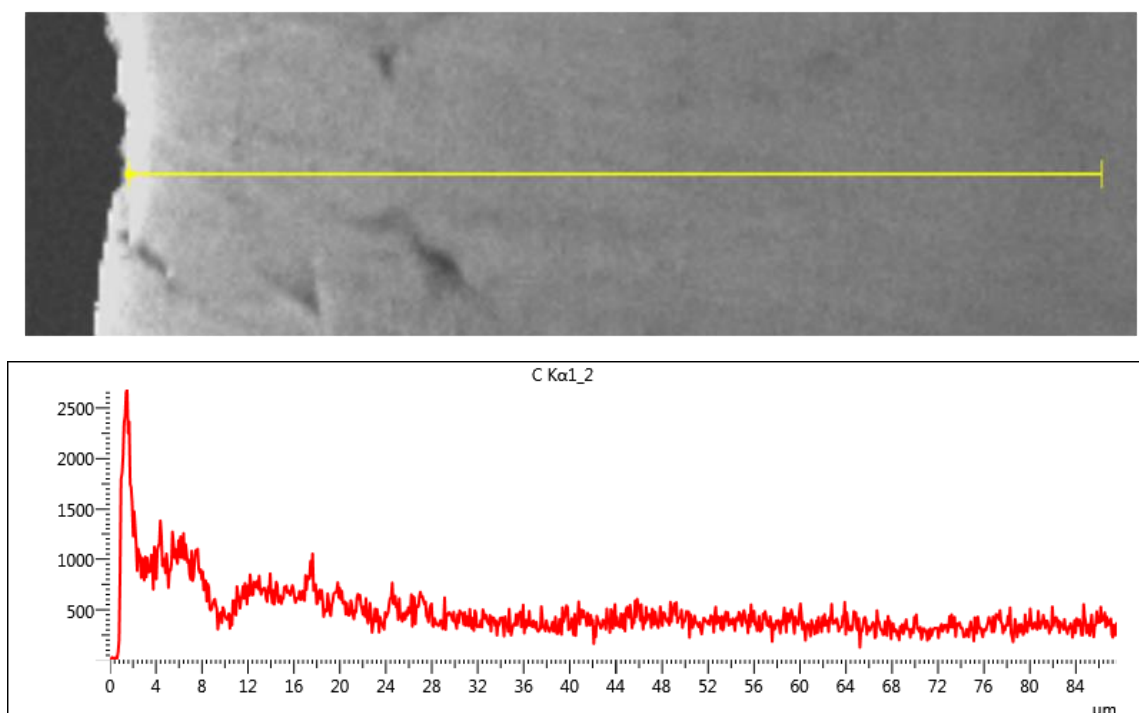
Apesar dos substratos 01 e 03 possuírem diferentes parâmetros de processamento, os dois perfis mostraram semelhanças em termos de microdureza versus profundidade. A resolução do substrato 01 é maior que do substrato 03, no entanto a densidade de energia do substrato 01 é menor que do substrato 03. Tanto uma elevada densidade de energia (J/mm^2) quanto uma elevada resolução (ppp) contribuem para o aumento da temperatura superficial do substrato e possivelmente para o processo de ablação do pó de negro de fumo.

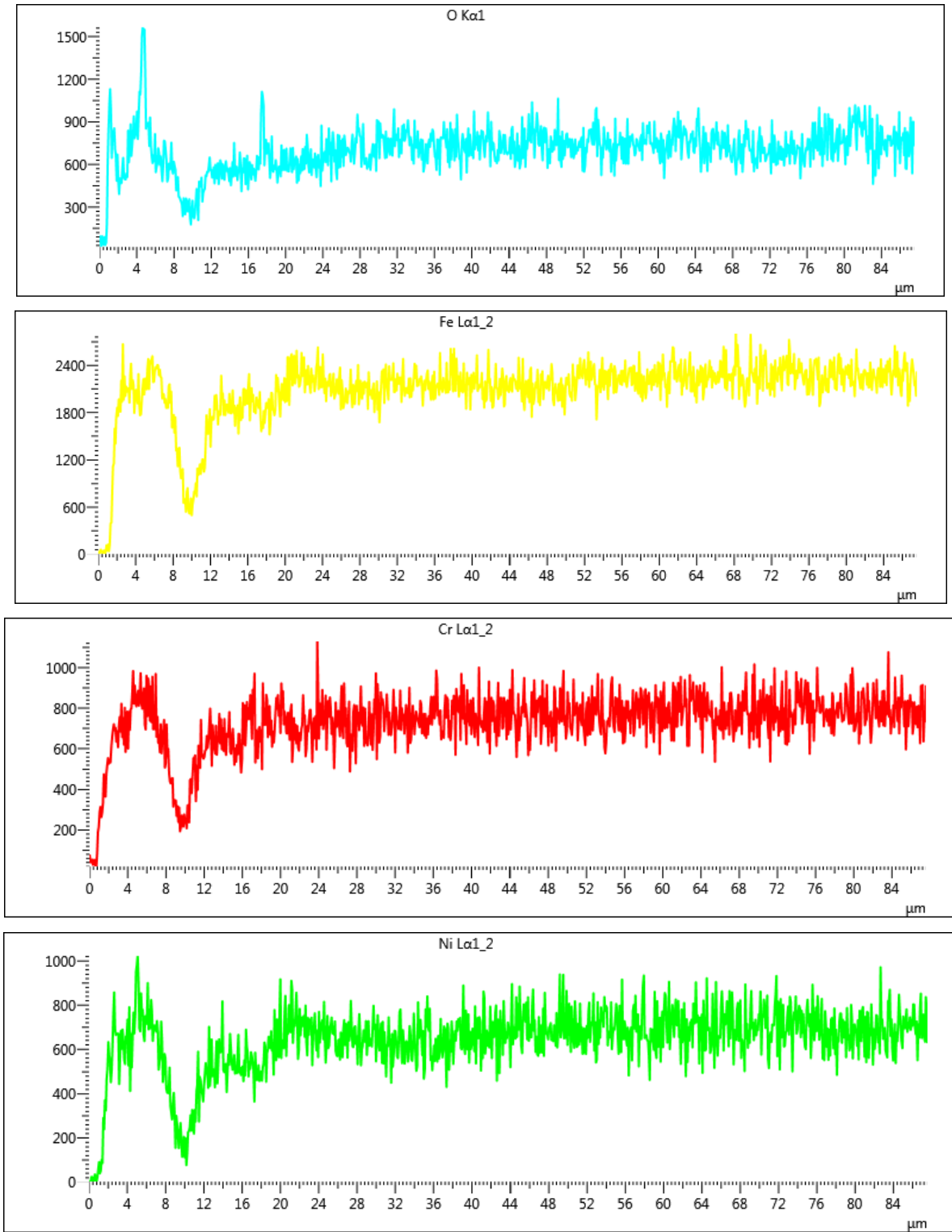
As figuras 5.6 e 5.7 e 5.8 mostram o escaneamento em linha via EDS das seções retas das amostras 01, 02 e 03 respectivamente.

Os três substratos apresentam um decréscimo da intensidade do elemento carbono da superfície para o interior do substrato, como também um decréscimo da microdureza para o interior do substrato (figura 5.5). O mesmo perfil foi encontrado no trabalho de Oliveira (2014). Diante desse comportamento, pode-se inferir que o aumento da microdureza ao longo da profundidade é devido ao processo difusional do carbono para a formação da camada endurecida.

No substrato 02 é possível observar picos do elemento carbono em até 80 micrometros de profundidade do substrato, o que corrobora com o maior perfil de microdureza ao longo da profundidade quando comparada com os substratos 01 e 03 na figura 5.5.

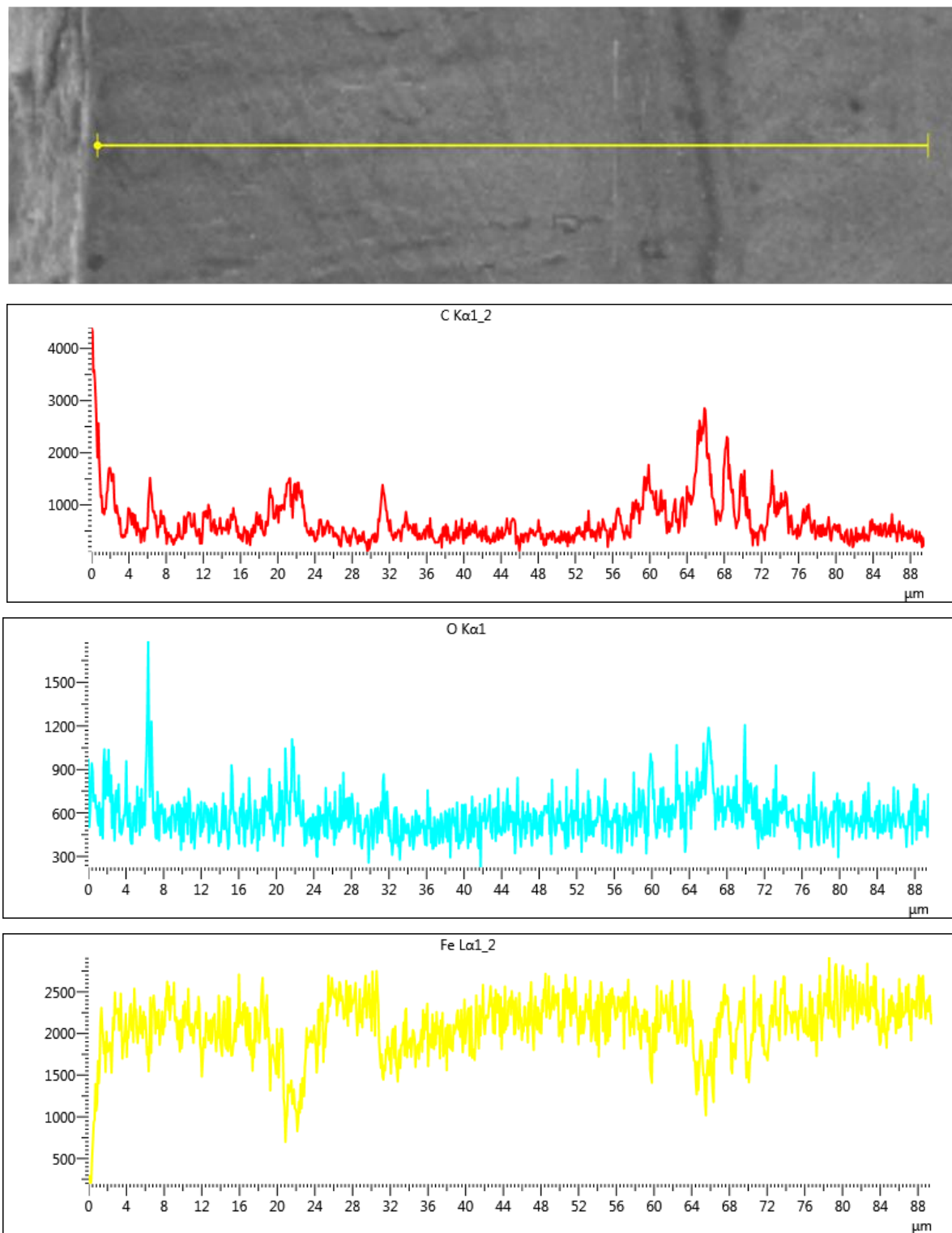
Figura 5.6 – Escaneamento em linha da seção reta do substrato 01.

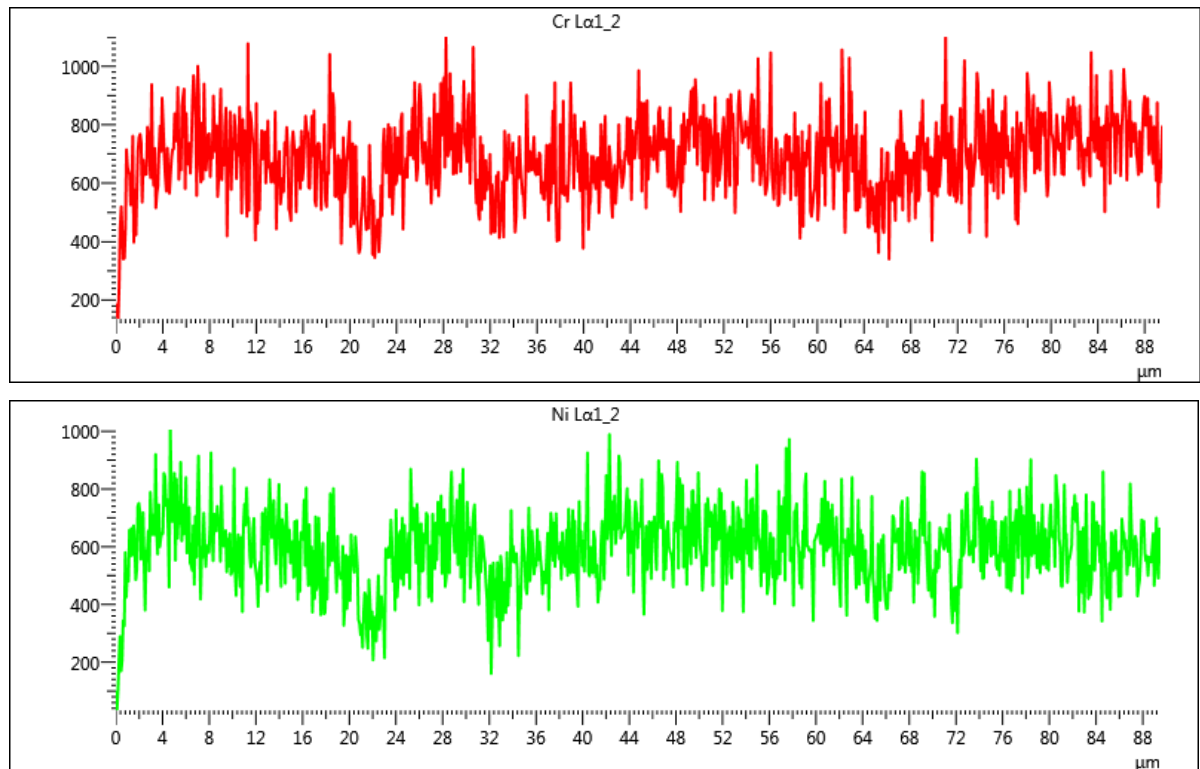




Fonte: Produzido pelo autor.

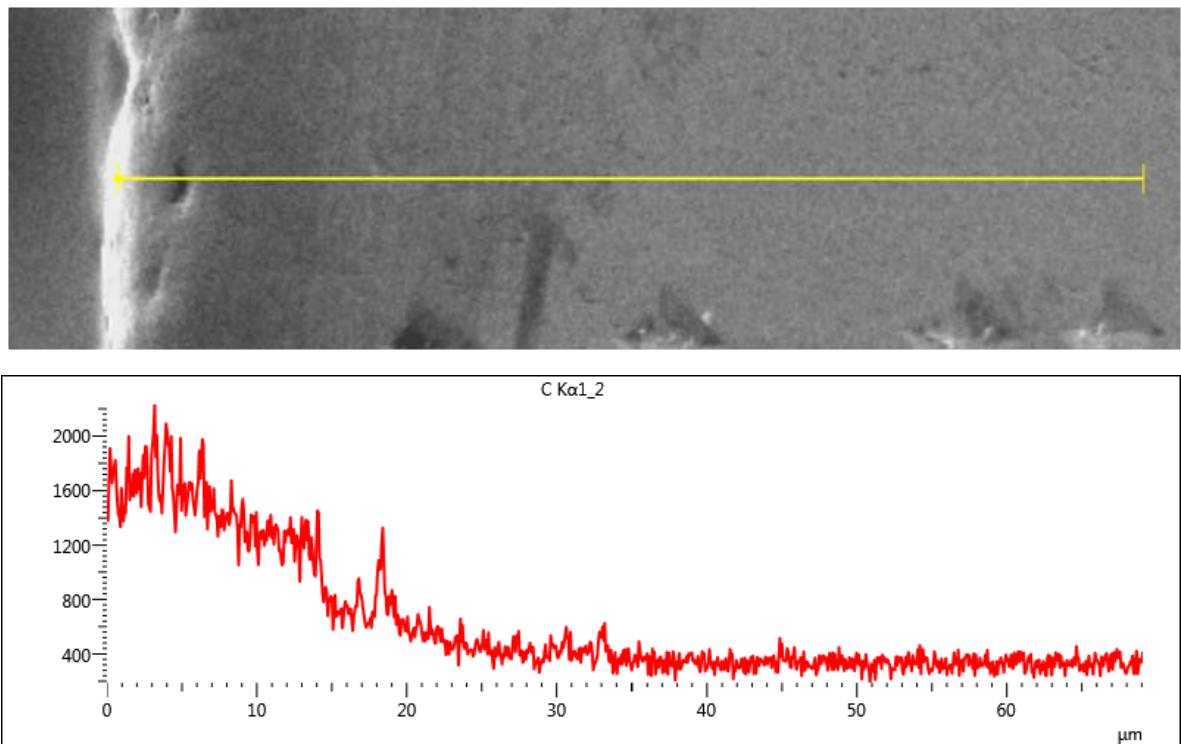
Figura 5.7 – Escaneamento em linha da seção reta do substrato 02.

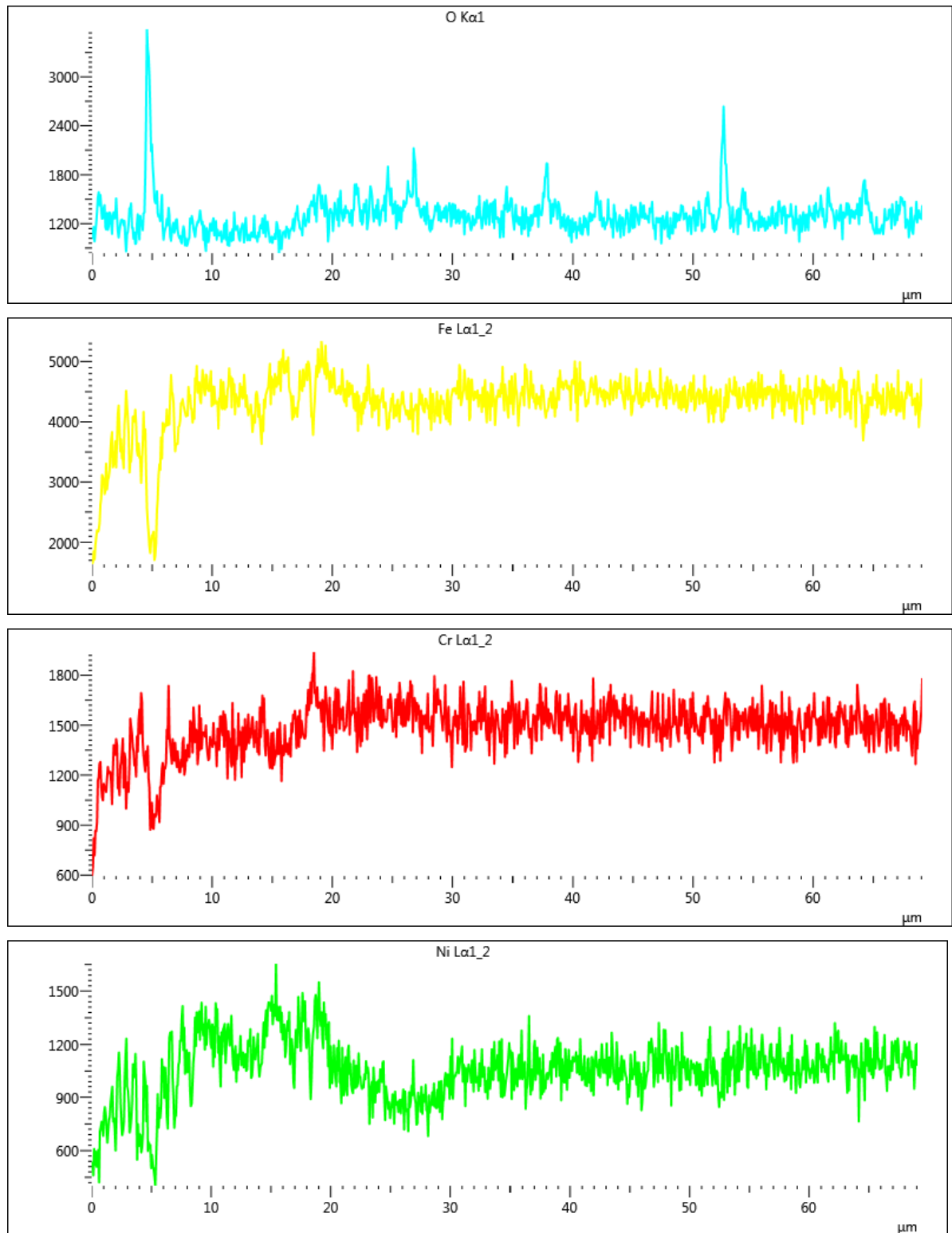




Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 5.8 – Escaneamento em linha da seção reta do substrato 03.





Fonte: Produzido pelo autor.

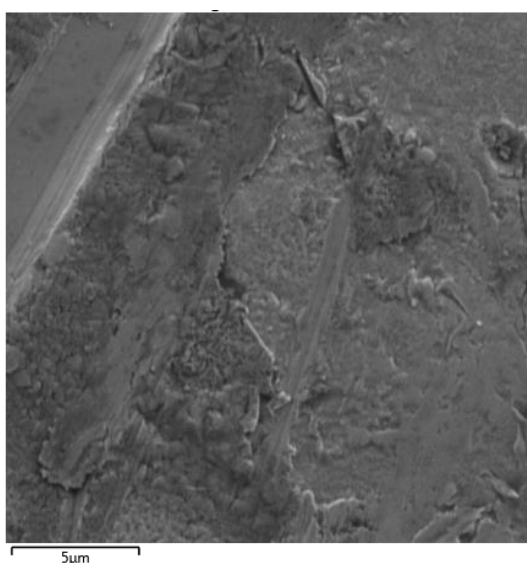
É possível notar que o substrato 02 apresenta uma camada endurecida sem a presença de trincas e poros quando comparada com os substratos 01 e 03. A porosidade tem efeito negativo na resistência e ductilidade do revestimento e é formada pelo aprisionamento do gás na

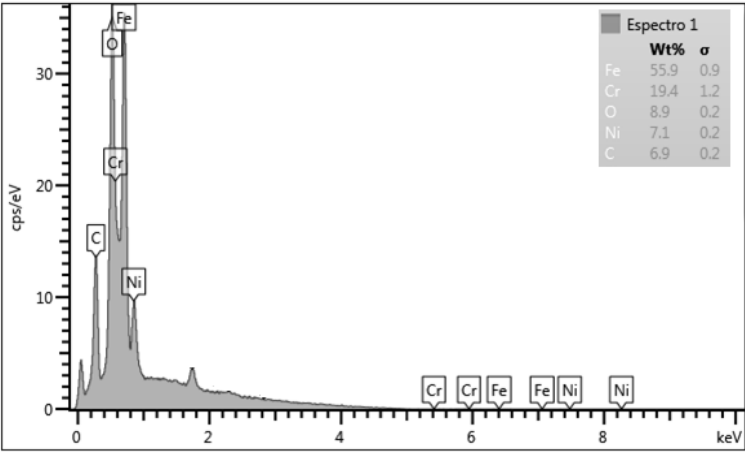
camada revestida (HALDAR; SAHA, 2018). Um exemplo está no substrato 03 que apresenta um poro formado majoritariamente pelo elemento oxigênio (figura 5.8) já que as irradiações foram feitas sem atmosfera inerte. Já a formação de trincas é atribuída ao estresse residual devido ao rápido aquecimento e resfriamento (LI; HUANG; YI, 2023). Estes fatos denotam que os parâmetros de irradiação do substrato 02 foram ideais para o incremento da microdureza ao longo do substrato e da inibição de fragilidade no revestimento.

As figuras 5.9 e 5.10 mostram as imagens MEV e EDS das superfícies dos substratos 01 e 02, respectivamente. As áreas selecionadas para as análises EDS da concentração semi-quantitativa das amostras consistem das áreas totais de cada imagem, com energia do feixe de elétrons de 5 kV. Tanto para o substrato 01 como para o 02, há o aparecimento do elemento carbono, com concentrações em massa de 6,9 % para o substrato 01 e 22,3% para o substrato 02. As análises semiquantitativas corroboram com os resultados apresentados nos escaneamentos em linhas. Salienta-se ainda que as regiões escuras correspondem a maior concentração de carbono.

No substrato 02 o elemento carbono tem maior concentração, possivelmente o emprego de uma resolução mais baixa, quando comparado com o substrato 01, favoreceu a difusão do carbono oriundo do negro de fumo em detrimento de resoluções maiores (substrato 01), que causam um acúmulo de energia na superfície devido a sobreposição dos pulsos e assim favorece o processo de ablação do pó de negro de fumo.

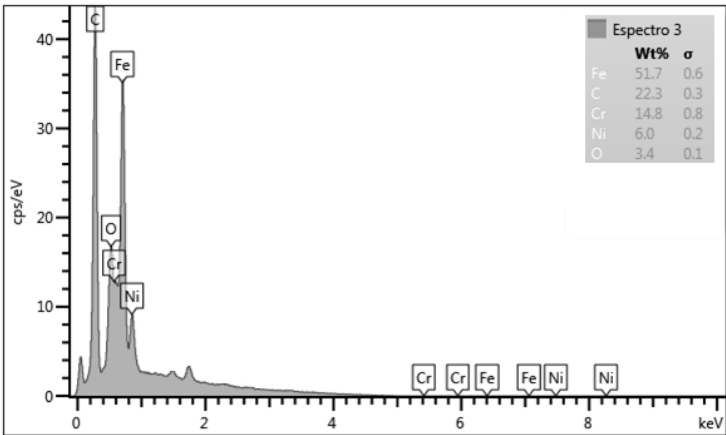
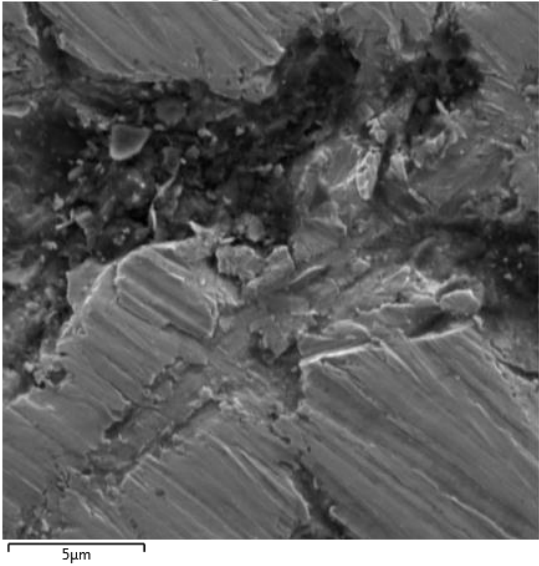
Figura 5.9 – Imagem MEV e EDS da superfície do substrato 01.





Fonte: Produzido pelo autor.

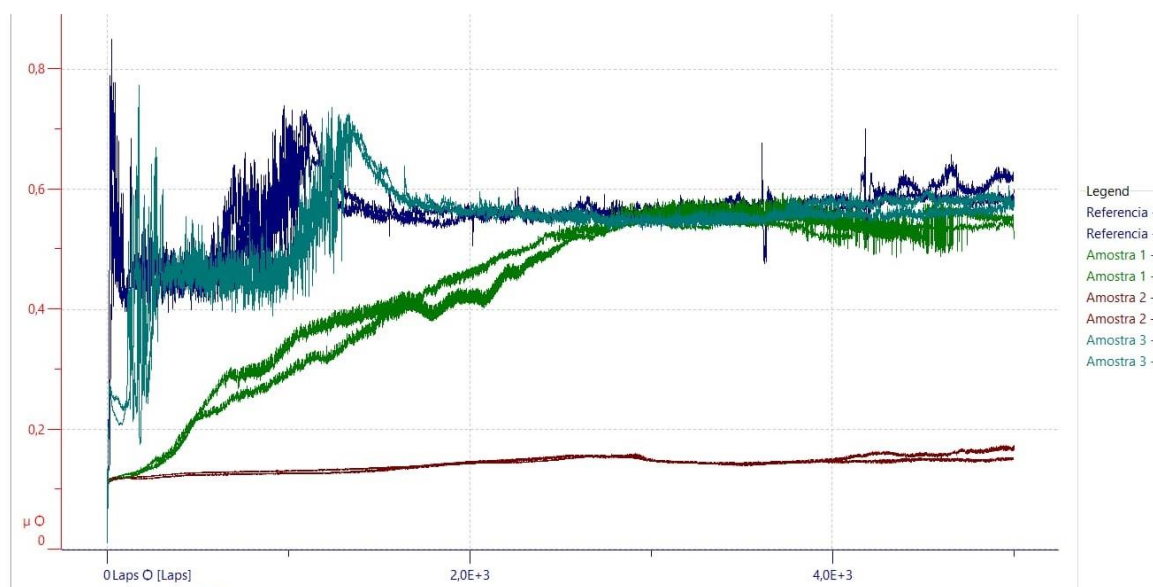
Figura 5.10 — Imagem MEV e EDS da superfície do substrato 02.



Fonte: Produzido pelo autor.

A figura 5.11 mostra os resultados de coeficiente de atrito dos substratos de referência, 01, 02 e 03 no ensaio de pino sobre disco no modo recíprocante linear e 5000 ciclos com uma carga de 5 N. O contra corpo empregado foi uma esfera de aço 100Cr6 de elevada dureza, a fim de desgastar os revestimentos. A tabela 5.2 evidencia os resultados obtidos.

Figura 5.11 — Gráfico do coeficiente de atrito das amostras.



Fonte: Produzido pelo autor.

A figura 5.11 mostra a diminuição dos coeficientes de atritos das amostras quando comparadas com o substrato referência. A carga aplicada de 5 N ocasionou o desgaste gradativo das camadas endurecidas nas condições 01 e 03.

No substrato 03 observa-se um coeficiente de atrito de 0,2 até 125 ciclos, a partir disso o coeficiente de atrito ficou próximo ao coeficiente do substrato referência, fato que indica o desgaste da camada de carbono de forma abrupta, com a exposição do substrato a partir de 125 ciclos de ensaio. No substrato 01 é possível observar que o coeficiente de atrito ficou próximo ao substrato referência após 2500 ciclos de ensaio, com um desgaste gradativo da camada endurecida de carbono. Já no substrato 02, o coeficiente de atrito ficou abaixo do coeficiente de atrito do substrato de referência até o final do ensaio.

A tabela 5.2 evidencia os resultados dos ensaios tribológicos. Nota-se que nas 3 condições de processamento, o valor médio do coeficiente de atrito ao longo de todo o ensaio ficou abaixo do substrato referência. Já o substrato 02 apresentou o menor valor médio de coeficiente de atrito.

Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios tribológicos

Substrato	Valor médio do coeficiente de atrito ao longo do ensaio	Desvio padrão do coeficiente de atrito ao longo do ensaio
Referência	0,55797	0,00120
01	0,43705	0,00326
02	0,14106	0,00220
03	0,53806	0,00193

Fonte: Produzido pelo autor.

O substrato 03 apresentou o maior valor médio do coeficiente de atrito quando comparado com os substratos processados via laser. Este fato pode indicar que os parâmetros de processamento via laser não foram ideais para a formação de uma camada de negro de fumo e da posterior difusão do carbono no interior do substrato. De fato, a figura 5.8 mostra um pico do elemento oxigênio em elevada intensidade na superfície, o que pode indicar um poro na camada. Esse fato indica a formação de uma camada suscetível a elevados desgastes.

Yamaguchi et al. (2021) estudaram o efeito da concentração de oxigênio no ambiente da irradiação via laser cladding de um pó de WC-Co sobre um substrato de aço inox 304. No ambiente convencional, o revestimento formado apresentou elevada porosidade, já em ambiente com baixa concentração de oxigênio foi eficaz na prevenção da formação de poros e trincas na camada.

O substrato 01 apresentou condições intermediárias do valor médio do coeficiente de atrito. Ademais, a figura 5.6 evidencia a presença de poros na camada, como também de trincas.

Se a energia for muito elevada, causa defeitos como trincas ou ablação do material (AB-DALLA et al., 2015).

O substrato 02 apresentou o menor valor de coeficiente de atrito ao longo de todo o ensaio. A figura 5.7 mostra uma seção reta da camada sem a presença de poros e trincas, esse fato possivelmente incrementou a resistência ao desgaste quando comparado com os substratos 01 e 02. Ademais, o substrato 02 tem uma elevada concentração de carbono superficial, oriunda do negro de fumo (figura 5.10), o que acarretou ao menor valor de coeficiente de atrito ao longo de todo o ensaio. Pode-se inferir que o negro de fumo atuou como um lubrificante sólido, diminuindo, por este modo, o coeficiente de atrito.

No trabalho de Vasconcelos et al. (2012) foi empregado o pó de negro de fumo como material foto absorvedor em um aço AISI 4340. Os resultados do ensaio de tribometro com

carga de 5N mostraram uma diminuição do coeficiente de atrito da amostra revestida (coeficiente de atrito de 0,20) quando comparada com a amostra sem o revestimento (coeficiente de atrito de 0,70). No trabalho de Custódio (2021) foi avaliado as propriedades tribológicas de amostras de aço SAE 4340 com microcavidades superficiais preenchidas com negro de fumo, via laser. Os resultados demonstraram que as amostras com microcavidades e preenchidas com negro de fumo apresentaram coeficientes de atrito com redução, de 0,7 para 0,06. A microcavidade preenchida com negro de fumo atuou como um lubrificante sólido.

O substrato 02 apresentou o maior perfil de incremento de microdureza ao longo do interior do substrato; com o incremento da microdureza superficial, a taxa de desgaste também decresce. Gopi et al., (2014) analisaram o efeito do processo de refino superficial na dureza, taxa de desgaste e coeficiente de atrito de uma liga fundida formada por Cu 4% em peso, equilíbrio de Al. Os resultados demonstraram que a taxa de desgaste diminuiu com o aumento da dureza. No trabalho de Vasconcelos et al. (2010) os resultados mostraram que o revestimento de negro de fumo, aplicado via laser em um aço 4340, reduziu a taxa de desgaste em aproximadamente 110x em comparação com a superfície sem revestimento.

Os resultados apresentados na dissertação demonstram o aumento da dureza superficial, diminuição do coeficiente de atrito e com isso evidenciam o aumento da vida útil dos substratos de aço inox 304. Já a aplicação do negro de fumo tem uma função tripla, atua como material foto absorvedor da radiação, fonte de carbono para o incremento da dureza superficial e como lubrificante sólido.

Na literatura é conhecido que os aços inoxidáveis austeníticos não podem ser endurecidos por tratamentos térmicos. Trabalho a frio ou a quente (laminação, forjamento etc.) podem contornar esse obstáculo, com a formação de martensita, de estrutura cúbica de corpo centrado ou hexagonal compacta (MILAD et al., 2008).

A contribuição do trabalho frente a literatura está na utilização de um laser de CO₂ de baixo custo com o emprego de negro de fumo afim de incrementar a dureza superficial de aços inoxidáveis 304. Outro fato importante da aplicação do laser é seu tempo de processo, sendo realizado em poucos minutos.

6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Os resultados expressam a eficácia na utilização de um laser de baixa potência e baixo custo no tratamento superficial em um aço inox 304. O emprego do negro de fumo atuou como material absorvedor da radiação, além de fonte de carbono, o que acarretou o aumento da dureza superficial nos substratos. Verificou-se a importância nos parâmetros de irradiação, o que levou a diferenças em termos de dureza e coeficiente de atrito, sendo que a condição do substrato 02 apresentou os melhores resultados. Além do endurecimento superficial, ficou evidente que o emprego do negro de fumo reduziu o coeficiente de atrito.

Embora o processo de tratamento a laser com o emprego de negro de fumo possa resultar em um aumento da concentração de carbono na superfície do aço inox 304, esse efeito pode ser controlado e ajustado para atender às necessidades específicas de cada aplicação.

Também ficou evidente que a escolha dos parâmetros de irradiação influenciou na qualidade da camada endurecida, em termos de trincas e porosidade.

Frente aos resultados promissores aqui relatados, o emprego de um laser de baixo custo é promissor para tratamentos de superfície. As sugestões para trabalhos futuros são a realização de análises para a obtenção da taxa de desgaste do material, análise MEV da trilha de desgaste, como também do estudo da densificação e minimização de trincas da camada endurecida via laser. Devido a versatilidade processo, outra proposta seria a adição de outros pós juntamente com o negro de fumo, a fim de aumentar a densificação da camada, como também da irradiação via laser em atmosfera inerte, a fim de evitar a presença do oxigênio na interface e na superfície.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALLA, A. J. et al. **Laser surface treatment of SAE 4340 and 300M steels**. Materials Science Forum. **Anais...**Trans Tech Publications Ltd, 2015.
- ALVES, J.; BRANDAO, L. P.; PAULA, A. Determination of phases and residual stresses after martensitic transformation induced by rolling in 304L stainless steel. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, 1 jan. 2019.
- BANSOD, A. V. , P. A. P. , M. Intergranular Corrosion Behavior of Low-Nickel and 304 Austenitic Stainless Steels. **J. of Materi Eng and Perform**, v. 25, 2016.
- BATISTA, C. et al. Surface laser-glazing of plasma-sprayed thermal barrier coatings. **Applied Surface Science**, v. 247, n. 1–4, p. 313–319, 15 jul. 2005.
- CAI, X. et al. Effect of process parameters on microstructures and properties of Al–42Si alloy fabricated by selective laser melting. **Heliyon**, v. 8, n. 6, 1 jun. 2022.
- CERDAN, K. et al. Laser sintering of self-healable and recyclable thermoset networks. **European Polymer Journal**, v. 175, p. 111383, 15 jul. 2022.
- DE VASCONCELOS, G. et al. **Covering steel surface with carbon black by CO2 laser**. Materials Science Forum. **Anais...**Trans Tech Publications Ltd, 2010.
- EMAMIAN, A.; CORBIN, S.; KHAJEPOUR, A. Effect of laser cladding process parameters on clad quality and in-situ formed microstructure of Fe–TiC composite coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 205, p. 2007–2015, 25 dez. 2010.
- GOPI, V.; SELLAMUTHU, R.; ARUL, S. Measurement of Hardness, Wear Rate and Coefficient of Friction of Surface Refined Al-Cu Alloy. **Procedia Engineering**, v. 97, p. 1355–1360, 1 jan. 2014.
- HALDAR, B.; SAHA, P. Identifying defects and problems in laser cladding and suggestions of some remedies for the same. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 5, p. 13090–13101, 1 jan. 2018.
- HELDER DE SOUZA OLIVEIRA. **Tratamento térmico com laser de CO2 de anéis automotivos recobertos com negro de fumo**. São José dos Campos: ITA, 2014.

KATSAMAS, A.; HAIDEMENOPOULOS, G. Laser-beam carburizing of low-alloy steels. **Surface and Coatings Technology**, v. 139, p. 183–191, 1 maio 2001.

LEI, J. et al. Enhanced corrosion and wear resistance properties of carbon fiber reinforced Ni-based composite coating by laser cladding. **Surface and Coatings Technology**, v. 334, p. 274–285, 25 jan. 2018.

LI, M.; HUANG, K.; YI, X. **Crack Formation Mechanisms and Control Methods of Laser Cladding Coatings: A Review**. **CoatingsMDPI**, , 1 jun. 2023.

LIU, K. et al. Effect of high dilution on the in situ synthesis of Ni–Zr/Zr–Si(B, C) reinforced composite coating on zirconium alloy substrate by laser cladding. **Materials & Design**, v. 87, p. 66–74, 15 dez. 2015.

LIU, S.; WANG, Y.; ZHANG, W. Microstructure and Wear Resistance of Laser Clad Cobalt-based Composite Coating on TA15 Surface. **Rare Metal Materials and Engineering**, v. 43, n. 5, p. 1041–1046, 1 maio 2014.

LIU, X. B. et al. Development and characterization of laser clad high temperature self-lubricating wear resistant composite coatings on Ti–6Al–4V alloy. **Materials & Design**, v. 55, p. 404–409, 1 mar. 2014.

LIU, Y. et al. Research and progress of laser cladding on engineering alloys: A review. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 66, p. 341–363, 1 jun. 2021a.

LIU, Y. et al. **Research and progress of laser cladding on engineering alloys: A review**. **Journal of Manufacturing Processes**Elsevier Ltd, , 1 jun. 2021b.

LU, Y. et al. Influence of multi-pass laser hardening of normalized AISI 4140 on the grain size. **Surface and Coatings Technology**, v. 421, p. 127434, 1 jun. 2021.

MAHMOUD, E. R. I. Characterizations of 304 stainless steel laser clad with titanium carbide particles. **Advances in Production Engineering and Management**, v. 10, n. 3, p. 115–124, 1 set. 2015.

MAIMAN, T. The Ruby Maser Distraction. Em: [s.l: s.n.]. p. 59–66.

MAJUMDAR, J.; KUMAR, A.; LI, L. Direct laser cladding of SiC dispersed AISI 316L stainless steel. **Tribology International**, v. 42, p. 750–753, 1 maio 2009.

MICHLER, T. Austenitic Stainless Steels. Em: **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering**. [s.l.: s.n.].

MIGUEL VAZ JR.A *, E. R. H. M. T. A Note on Parameter Identification of the AISI 304 Stainless Steel Using Micromechanical-Based Phenomenological Approaches. **Materials Research**, v. 22, 2019.

MILAD, M. et al. The effect of cold work on structure and properties of AISI 304 stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 203, n. 1–3, p. 80–85, 18 jul. 2008.

MORADI, M.; KARAMI MOGHADAM, M.; KAZAZI, M. Improved laser surface hardening of AISI 4130 low alloy steel with electrophoretically deposited carbon coating. **Optik**, v. 178, p. 614–622, 1 fev. 2019.

MORADI, M.; KARAMIMOOGHADAM, M.; KAZAZI, M. Improved Laser Surface Hardening of AISI 4130 Low Alloy Steel with Electrophoretically Deposited Carbon Coating. **Optik**, v. 178, 10 out. 2018.

NAEEM, M. et al. Enhanced wear and corrosion resistance of AISI-304 steel by duplex cathodic cage plasma treatment. **Surface and Coatings Technology**, v. 375, p. 34–45, 15 out. 2019.

PARK, J. et al. Improvement of friction characteristics of cast aluminum-silicon alloy by laser shock peening. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 266, 1 nov. 2018.

PINKERTON, A.; LI, L. An analytical model of energy distribution in laser direct metal deposition. **Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part B-journal of Engineering Manufacture - PROC INST MECH ENG B-J ENG MA**, v. 218, p. 363–374, 1 abr. 2004.

RAWICZ, A. H. **Theodore Harold Maiman and the invention of laser**. (P. Tománek, D. Senderáková, M. Hrabovský, Eds.) Photonics, Devices, and Systems IV. **Anais...** 18 nov. 2008.

RENAN MICHEL DA SILVA CUSTÓDIO. **EFEITOS DA ESTRUTURAÇÃO E DEPOSIÇÃO DE NEGRO DE FUMO COM O USO DE LASER EM UM AÇO SAE 4340 SUBMETIDO AO DESGASTE**. São José

dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2021.

SALEH, B.; TEICH, M. **Fundamentals of Photonics, 3rd Edition**. [s.l: s.n.].

SANTOS, C. L. DOS. **Estudo do processo de sinterização/fusão de Stellite 6 com laser de Co2 de 125 W**. Tese de Doutorado—[s.l.] ITA, 2017.

SCHINO, A.; KENNY, J. Effects of the grain size on the corrosion behavior of refined AISI 304 austenitic stainless steels. **Journal of Materials Science Letters**, v. 21, p. 1631–1634, 1 out. 2002.

SIDDIQUI, A. A.; DUBEY, A. K. Recent trends in laser cladding and surface alloying. **Optics & Laser Technology**, v. 134, p. 106619, 2021a.

SIDDIQUI, A. A.; DUBEY, A. K. **Recent trends in laser cladding and surface alloying. Optics and Laser Technology** Elsevier Ltd, , 1 fev. 2021b.

SIDDIQUI, A.; DUBEY, A. Recent trends in laser cladding and surface alloying. **Optics & Laser Technology**, v. 134, 6 out. 2020.

STEEN, W. M.; MAZUMDER, J. **Laser material processing**. [s.l.] springer science & business media, 2010.

SUN, Y.; HAO, M. Statistical analysis and optimization of process parameters in Ti6Al4V laser cladding using Nd:YAG laser. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 50, p. 985–995, 1 jul. 2012.

TAKACS, S. S. O. LASERSKOG SVETLA. Characteristics of laser light. **Med Pregl**, p. 29–34, 1999.

T.S. SELEKA* AND S.L. PITYANA. Laser surface melting of 304 stainless steel for pitting corrosion resistance improvement. **The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 107, 2007.

TSCHIPTSCHIN, A.; PINEDO, C. Structure and properties of an austenitic stainless steel AISI 316L grade ASTM F138 after low temperature plasma nitriding. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 63, p. 137–141, 1 mar. 2010.

VASCONCELOS, G. et al. **Covering with carbon black and thermal treatment by a CO2 laser**

surfaces of AISI 4340 steel. Materials Science Forum. **Anais...**Trans Tech Publications Ltd, 2012.

VASCONCELOS, G.; C., D.; N., A. Covering with Carbon Black and Thermal Treatment by CO₂ Laser Surfaces of AISI 4340 Steel. Em: **CO₂ Laser - Optimisation and Application.** [s.l.] InTech, 2012. p. 275–282.

WENG, F.; CHEN, C.; YU, H. **Research status of laser cladding on titanium and its alloys: A review.** **Materials and Design**Elsevier Ltd, , 2014a.

WENG, F.; CHEN, C.; YU, H. **Research status of laser cladding on titanium and its alloys: A review.** [s.l: s.n.]. v. 58p. 412–425

WILLIAMS, D. Laser basics. **Anaesthesia & Intensive Care Medicine**, v. 9, n. 12, p. 550–552, 1 dez. 2008.

WIRTH, F.; WEGENER, K. A physical modeling and predictive simulation of the laser cladding process. **Additive Manufacturing**, v. 22, p. 307–319, 1 ago. 2018.

XUE, P. et al. Effect of laser incident energy on the densification and structure–property relationships of additively manufactured CrCoNi medium-entropy alloy. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 16, p. 1–13, 16 jul. 2021.

YAMAGUCHI, T. H. H. Effects of the ambient oxygen concentration on WC-12Co cermet coatings fabricated by laser cladding. **Optics & Laser Technology**, 2021.

ZAFFORA, A.; DI FRANCO, F.; SANTAMARIA, M. Corrosion of stainless steel in food and pharmaceutical industry. **Current Opinion in Electrochemistry**, v. 29, p. 100760, 1 maio 2021.

ZHU, L. et al. **Recent research and development status of laser cladding: A review.** **Optics and Laser Technology**Elsevier Ltd, , 1 jun. 2021.