

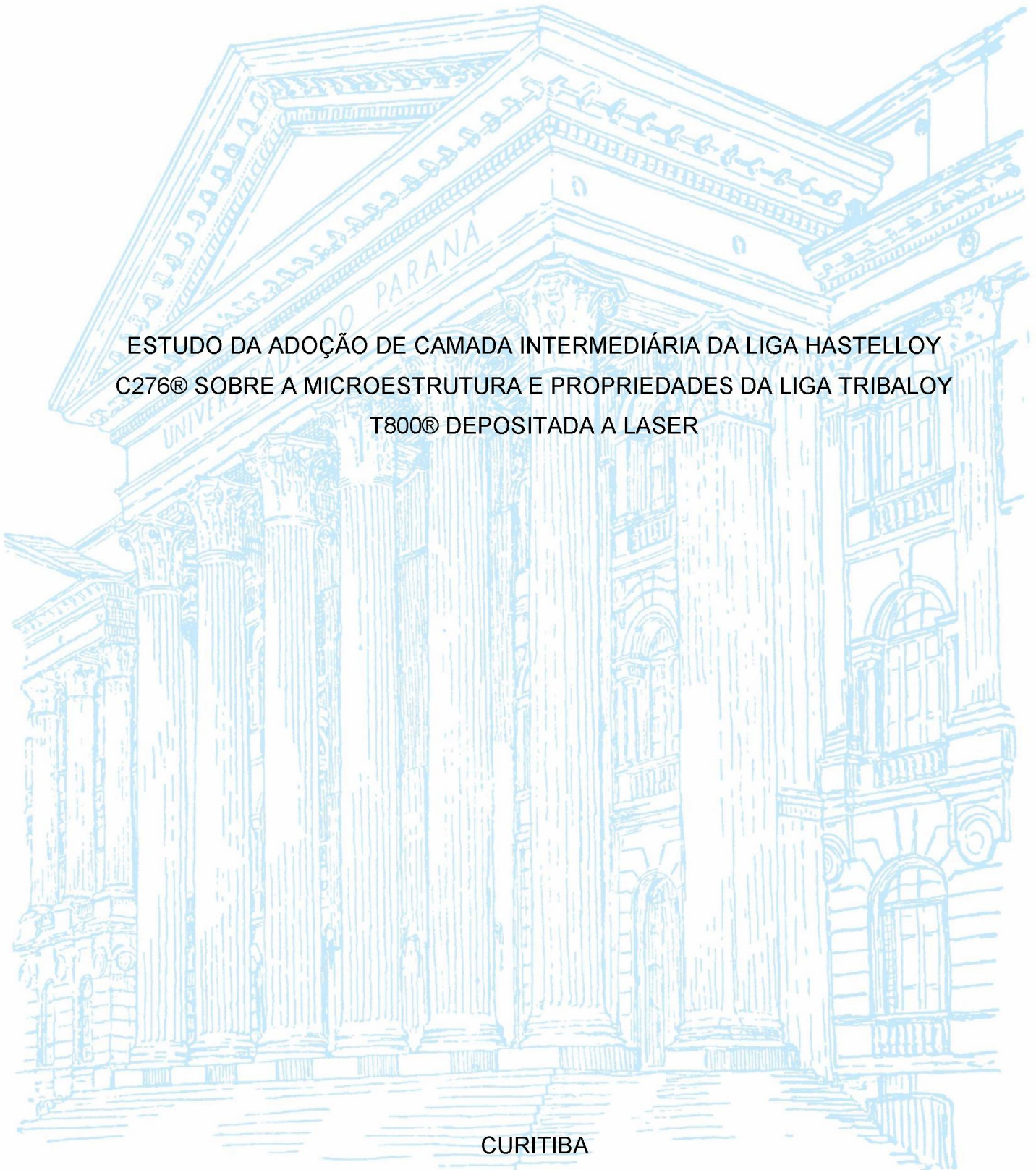
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ROBSON REIS DA SILVA

ESTUDO DA ADOÇÃO DE CAMADA INTERMEDIÁRIA DA LIGA HASTELLOY
C276® SOBRE A MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES DA LIGA TRIBALLOY
T800® DEPOSITADA A LASER

CURITIBA

2024



ROBSON REIS DA SILVA

ESTUDO DA ADOÇÃO DE CAMADA INTERMEDIÁRIA DA LIGA HASTELLOY
C276® SOBRE A MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES DA LIGA TRIBALLOY
T800® DEPOSITADA A LASER

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Scheid

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Silva, Robson Reis da

Estudo da adoção de camada intermediária da liga Hastelloy C276® sobre a microestrutura e propriedades da liga Tribaloy T800® depositada a laser / Robson Reis da Silva. – Curitiba, 2024.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Adriano Scheid

1. Deposição por laser. 2. Microestrutura. 3. Liga Hastelloy C276. 4. Liga Tribaloy T800. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Scheid, Adriano. IV. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ROBSON REIS DA SILVA** intitulada: **ESTUDO DA ADOÇÃO DE CAMADA INTERMEDIÁRIA DE LIGA HASTELOY C276 SOBRE A MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES DA LIGA TRIBALLOY T800 DEPOSITADA A LASER**, sob orientação do Prof. Dr. ADRIANO SCHEID, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 16 de Dezembro de 2024.

Assinatura Eletrônica

19/12/2024 07:46:00.0

ADRIANO SCHEID

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

17/12/2024 16:14:17.0

ALEX PIZZATTO

Avaliador Externo (ROBERT BOSCH LTDA)

Assinatura Eletrônica

17/12/2024 15:05:10.0

CARLOS EDUARDO FORTIS KWIETNIEWSKI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha querida esposa Daiana A. K. da Silva, que em todos os meus caminhos e decisões, vem me apoiando e ajudando. Sou muito grato por ter encontrado na vida uma companheira como ela, para todos os momentos.

Meu muito obrigado também ao Prof. Dr. Adriano Scheid, que através de seu grande amor pela pesquisa, despertou em mim também essa vontade. Com certeza vem sendo um grande exemplo para mim nesse sentido.

Agradeço aos meus pais, que apesar da pouca formação que tiveram, sempre me incentivaram a estudar e a me desenvolver. São um grande exemplo de vida para mim.

“A sabedoria faz com que o sábio seja mais poderoso do que dez homens fortes numa cidade.”

Rei Salomão (1000 a.C.)

RESUMO

A deposição a laser (*laser cladding*) foi desenvolvida na década de 70 nos Estados Unidos (Gnanamuth, U.S. Patent 3,952,180) e, após notável progresso tecnológico, tem sido usada em muitas áreas da indústria por mais de três décadas. Podemos encontrar exemplos na geração de energia, turbinas de aeronaves, além dos seguimentos naval, automotivo, óleo e gás, e muitos outros. Neste cenário, um material pode ser depositado sobre um substrato para melhorar sua resistência ao desgaste e/ou resistência à corrosão, tanto em componentes novos para aumento da sua vida útil, como em reparo de superfícies desgastadas. Um relatório recente mostrou que aproximadamente 23% do consumo total de energia do mundo origina-se de contatos tribológicos, sendo 20% para superar atrito e 3% para retrabalhar peças e/ou equipamentos desgastados, conseqüentemente, atraindo a atenção da comunidade científica nesse campo. No entanto, as rápidas taxas de aquecimento/resfriamento levam a altos gradientes térmicos e tensões que podem causar micro trincas no revestimento, assim como microestruturas refinadas fora de equilíbrio ou a formação de fases amorfas. Neste contexto, existe a possibilidade de investigação acerca do efeito da deposição de revestimentos de múltiplas camadas a laser, já que os modernos equipamentos apresentam duplo alimentador de ligas na forma de pó, permitindo a deposição de camadas intercaladas. O objetivo deste trabalho é investigar a deposição a laser da liga Tribaloy T800[®], de difícil deposição sem trincas (processabilidade), a partir do processamento conjugado de duas camadas, sendo a primeira da liga Hastelloy C276[®] e a segunda camada de liga Tribaloy T800[®]. No contexto apresentado, sugere-se que o pré-aquecimento decorrente da deposição da primeira camada e a baixa dureza da liga C276[®] possam auxiliar na redução da tendência ao trincamento da segunda camada de liga Tribaloy T800[®]. A deposição foi realizada a partir de revestimentos de múltiplos cordões com 30% de sobreposição e potências de laser de 2,0, 2,5 e 3,0 kW. Os resultados mostraram que a potência de laser não promove a eliminação do trincamento nos revestimentos de liga Tribaloy T800[®] para a deposição direta. Apesar disso, a microestrutura é alterada pela diluição, levando a modificações na dureza e resistência ao risco. Contudo, a adoção de uma camada intermediária de liga Hastelloy C276[®] permite a eliminação das trincas para uma potência de 3,0 kW. Mesmo assim, a dureza é mantida relativamente alta (~600 HV2) e os revestimentos apresentam baixo teor de ferro, revelando uma das condições promissoras do presente trabalho para o processamento a Laser da liga Tribaloy T800[®].

Palavras-chave: Deposição por laser. Revestimento em multicamadas. Hastelloy C276. Tribaloy T800. Microestrutura. Dureza. Resistencia ao Risco.

ABSTRACT

Laser cladding was developed in the seventies in the United States (Gnanamuth, U.S. Patent 3,952,180) and, after notable technological progress, it has been used in many industrial areas for more than 3 decades. Examples are met in power generation, aerospace turbines, marine, automotive, oil & gas, and many others. In these scenarios, a hard and/or corrosion-resistant material may be deposited on a substrate to withstand the wear and corrosion degradation either in new components enhancing the service life or repairing a worn-down surface. A recent report stated that ~23% of the world's total energy consumption originates from tribological contacts, 20% from overcoming friction, and 3% from remanufacturing worn parts and spare equipment due to wear and wear-related failures attracting, therefore, the attention of the scientific community in this field. However, the fast heating/cooling rates lead to high thermal gradients and stresses that may cause coating microcracks, as well as refined microstructures containing out-of-equilibrium or amorphous phases may be formed. In this context, there is a chance to investigate the effect of the deposition of multilayer laser coatings, since modern equipment has a double feed system of alloys in the powder form, allowing the deposition of multiple layers. This work aims to investigate the laser deposition of Tribaloy T800™ alloy - which is hard to obtain as crack-free coatings (processability) - from the conjugate processing of two layers, the first being of Hastelloy C276™ alloy and the second layer of Tribaloy T800™ alloy. It is suggested that the deposition of the first layer serves as a preheated substrate and the low hardness of the C276 alloy can also help to reduce the cracking tendency of the second layer of the Tribaloy T800™ alloy. The deposition was carried out from coatings of multiple beads with 30% overlapping degree and laser powers of 2.0, 2.5, and 3.0 kW. Results demonstrated that the laser power does not promote the elimination of cracking in Tribaloy T800™ alloy coatings for direct deposition. Despite this, the microstructure is altered by dilution, leading to changes in hardness and scratch resistance. Otherwise, the adoption of an intermediate layer of Hastelloy C276™ alloy allows the elimination of cracks for a power of 3.0 kW. Even so, the hardness is kept relatively high (~600 HV2) and the coatings have a low iron content, revealing one of the promising conditions of the present investigation about the Laser processing of the Tribaloy T800™ alloy.

Keywords: Laser Cladding. Multilayered Coatings. Hastelloy C276. Tribaloy T800. Microstructure. Vickers Hardness. Scratch Resistance.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO DE DEPOSIÇÃO POR LASER CLADDING	19
FIGURA 2 – LASER (a) UTILIZADO NO TRATAMENTO SUPERFICIAL E (b) NA DEPOSIÇÃO DE UM MATERIAL SOBRE UM SUBSTRATO	20
FIGURA 3 – EXEMPLO DA DEPOSIÇÃO DE METAL PELO PROCESSO DE LASER <i>CLADDING</i>	21
FIGURA 4 – VISTAS DE UM MATERIAL DEPOSITADO POR LASER: (a) TRANSVERSAL, (b) LONGITUDINAL E (c) ORTOGONAL...	21
FIGURA 5 – MACROGRAFIAS DOS CORDÕES DE LIGA HASTELLOY C276® DEPOSITADOS SOBRE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304L COM POTÊNCIAS ENTRE 1,5 E 4,0 kW.....	23
FIGURA 6 – DILUIÇÃO TÍPICA PELO MÉTODO DE TOYSERKANI.....	24
FIGURA 7 – MICROESTRUTURA DE UMA SEÇÃO DE MULTICAMADAS COM CORTES: (a) TRANSVERSAL e (b) LONGITUDINAL	25
FIGURA 8 – ESQUEMA DE DEPOSIÇÃO NA FORMA DE MULTICAMADAS	26
FIGURA 9 – MICROESTRUTURA DA LIGA TRIBALLOY T800®.....	27
FIGURA 10 – CORTE TRANSVERSAL DE UMA LIGA TRIBALLOY T800® DEPOSITADA A LASER.....	28
FIGURA 11 – MICROESTRUTURA DA LIGA HASTELLOY C276® (a) AMPLIAÇÃO DE 5.000X,.....	29
FIGURA 12 – FLUXOGRAMA EXPERIMENTAL DA PESQUISA.....	30
FIGURA 13 – EQUIPAMENTO DE DEPOSIÇÃO A LASER UTILIZADO	32
FIGURA 14 – EQUIPAMENTO DE CORTE POR ELETROEROSÃO CHARMILLES ROBOFIL 290P®	33
FIGURA 15 – SECCIONADORA BRILLANT 220®	34
FIGURA 16 – EQUIPAMENTO DE EMBUTIMENTO A QUENTE OPAL 410® - QATM	35
FIGURA 17 – EQUIPAMENTO UTILIZADO NO ENSAIO DE DUREZA VICKERS HMV-G SERIES®	37
FIGURA 18 – INDENTADOR E LENTES DO EQUIPAMENTO HMV-G SERIES® ...	38
FIGURA 19 – ENSAIO DE RISCO COM INDENTADOR TIPO ESFÉRICO	38
FIGURA 20 – ENSAIO DE RISCO COM INDENTADOR TIPO BERKOVICH	39
FIGURA 21 – EQUIPAMENTO MARCA UNAT ZWICK ROELL®	40

FIGURA 22 – MACROGRAFIA DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS DE FORMA DIRETA DE TRIBALLOY T800® PURA EM POTÊNCIAS DE (a) 2,0 kW, (b) 2,5 kW e (c) 3,0 kW.	41
FIGURA 23 – MICROESTRUTURA DA LIGA TRIBALLOY DEPOSITADA SEM A CAMADA INTERMEDIÁRIA EM 2,0 kW COM AMPLIAÇÕES DE (a) 3.000, (b) 5.000 E (c) 10.000 VEZES.	42
FIGURA 24 – MICROESTRUTURA DA LIGA TRIBALLOY DEPOSITADA SEM A CAMADA INTERMEDIÁRIA EM 2,5 kW COM AMPLIAÇÕES DE (a) 3.000, (b) 5.000 E (c) 10.000 VEZES.	42
FIGURA 25 – MICROESTRUTURA DA LIGA TRIBALLOY DEPOSITADA SEM A CAMADA INTERMEDIÁRIA EM 3,0 kW COM AMPLIAÇÕES DE (a) 3.000, (b) 5.000 E (c) 10.000 VEZES.	43
FIGURA 26 – IMAGEM TRATADA PARA QUANTIFICAÇÃO DE FASES LAVES FORMADA EM POTÊNCIAS DE (a) 2,0 kW, (b) 2,5 kW e (c) 3,0 kW	43
FIGURA 27 – PADRÕES DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X DA CAMADA DE TRIBALLOY DEPOSITADA NAS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER	44
FIGURA 28 – EDS NO REVESTIMENTO DE LIGA TRIBALLOY T800® CONTENDO O MAPA COM PERCENTUAL DOS ELEMENTOS, DEPOSITADO EM (a) 2,0 kW, (b) 2,5 kW e (c) 3,0 kW	45
FIGURA 29 – GRÁFICO DE DUREZA DA CAMADA TRIBALLOY DEPOSITADA SEM A CAMADA INTERMEDIÁRIA.....	46
FIGURA 30 – MEV NOS RISCOS DOS CORDÕES DEPOSITADOS SEM A CAMADA INTERMEDIÁRIA EM (a) 2,0, (b) 2,5 E (c) 3,0 kW.....	47
FIGURA 31 – MEV NOS RISCOS DO MEIO AMPLIADOS EM 3.000 VEZES DEPOSITADOS SEM A CAMADA INTERMEDIÁRIA EM (a) 2,0, (b) 2,5 E (c) 3,0 kW	48
FIGURA 32 – IMAGEM BSE NA REGIÃO DOS RISCOS (SEM A CAMADA INTERMEDIÁRIA) COM AMPLIAÇÃO DE 1.000 VEZES EM (a) 2,0, (b) 2,5 E (c) 3,0 kW.....	48
FIGURA 33 – IMEGAM BSE NA REGIÃO DOS RISCOS (SEM A CAMADA INTERMEDIÁRIA) COM AMPLIAÇÃO DE 3.000 VEZES EM (a) 2,0, (b) 2,5 E (c) 3,0 kW.....	48

FIGURA 34 – RISCOS PARA CADA POTÊNCIA DA LIGA T800® DEPOSITADA SEM A CAMADA INTERMEDIÁRIA.....	49
FIGURA 35 – MACROGRAFIA NO CORTE TRANSVERSAL DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADAS EM POTÊNCIAS DE (a) 2,0 kW, (b) 2,5 kW e (c) 3,0 kW	50
FIGURA 36 – DETALHE DA TRINCA NO MATERIAL DEPOSITADO EM 2,0 KW. .	50
FIGURA 37 – MACROGRAFIA NA VISTA DE TOPO DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS COM POTÊNCIAS DE (a) 2,0 kW, (b) 2,5 kW e (c) 3,0 kW.....	50
FIGURA 38 – MACROGRAFIA NO MODO <i>COMPOSITIONAL MAPPING</i>	51
FIGURA 39 – (a) e (b) VISÃO GERAL HASTELLOY C276® (2,0 kW) E (c) DETALHES DA MICROESTRUTURA.....	51
FIGURA 40 – (a) e (b) VISÃO GERAL TRIBALLOY T800® (2,0 kW) E (c) DETALHES DA MICROESTRUTURA	52
FIGURA 41 – (a) VISÃO GERAL HASTELLOY C276® (2,5 kW) E (b) DETALHES DA MICROESTRUTURA	52
FIGURA 42 – (a) e (b) VISÃO GERAL TRIBALLOY T800® (2,5 kW) E (c) DETALHES DA MICROESTRUTURA	53
FIGURA 43 – (a) e (b) VISÃO GERAL HASTELLOY C276® (3,0 kW) E (c) DETALHES DA MICROESTRUTURA.....	53
FIGURA 44 – (a) e (b) VISÃO GERAL TRIBALLOY T800® (3,0 kW) E (c) DETALHES DA MICROESTRUTURA	54
FIGURA 45 – IMAGEM TRATADA PARA QUANTIFICAÇÃO DAS FASES LAVES FORMADAS NAS POTÊNCIAS DE (a) 2,0 kW, (b) 2,5 kW e (c) 3,0 KW.....	54
FIGURA 46 – PADRÕES DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X DA CAMADA DE TRIBALLOY DEPOSITADA SOBRE A CAMADA INTERMEDIÁRIA NAS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER.....	55
FIGURA 47 – EDS DO REVESTIMENTO TRIBALLOY CONTENDO O MAPA COM PERCENTUAL DOS ELEMENTOS, DEPOSITADO EM DUPLA CAMADA EM (a) 2,0 kW, (b) 2,5 kW e (c) 3,0 kW.....	56
FIGURA 48 – PERFIL DE DUREZA VICKERS DA AMOSTRA DEPOSITADA EM 2,0 KW COM CAMADA INTERMEDIÁRIA.....	58

FIGURA 49 – PERFIL DE DUREZA VICKERS DA AMOSTRA DEPOSITADA EM 2,5 kW COM CAMADA INTERMEDIÁRIA.....	58
FIGURA 50 – PERFIL DE DUREZA VICKERS DA AMOSTRA DEPOSITADA EM 3,0 kW COM CAMADA INTERMEDIÁRIA.....	59
FIGURA 51 – MEV NOS RISCOS DOS CORDÕES DEPOSITADOS COM A CAMADA INTERMEDIÁRIA EM (a) 2,0, (b) 2,5 E (c) 3,0 kW.....	60
FIGURA 52 – MEV NOS RISCOS DO MEIO AMPLIADOS EM 3.000 VEZES DEPOSITADOS COM A CAMADA INTERMEDIÁRIA EM (a) 2,0, (b) 2,5 E (c) 3,0 kW	61
FIGURA 53 – EDS REALIZADO NA REGIÃO DOS RISCOS (COM A CAMADA INTERMEDIÁRIA) COM AMPLIAÇÃO DE 1.000 VEZES EM (a) 2,0, (b) 2,5 E (c) 3,0 kW.....	61
FIGURA 54 – EDS REALIZADO NA REGIÃO DOS RISCOS (COM A CAMADA INTERMEDIÁRIA) COM AMPLIAÇÃO DE 3.000 VEZES EM (a) 2,0, (b) 2,5 E (c) 3,0 kW.....	61
FIGURA 55 – PROFUNDIDADE DOS RISCOS PARA CADA POTÊNCIA DA LIGA T800® DEPOSITADA SOBRE UMA CAMADA INTERMEDIÁRIA	62

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES DO TRIBALLOY T800®	27
QUADRO 2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES DO HASTELLOY C276®	29

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS LIGAS	31
TABELA 2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO SUBSTRATO	31
TABELA 3 – PARÂMETROS DE REVESTIMENTO CONTROLADOS	32
TABELA 4 – DILUIÇÃO DA LIGA T800® DEPOSITADA SOBRE AISI 304L	46
TABELA 5 – DILUIÇÃO DA CAMADA 02 EM RELAÇÃO À CAMADA INTERMEDIÁRIA C276®	57

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

AISI	American Iron and Steel Institute
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
BD	<i>Build-up Direction</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CGAA	Contorno de Grão de Alto Ângulo
CGBA	Contorno de Grão de Baixo Ângulo
CME	Centro de Microscopia Eletrônica
Co	Cobalto
Cr	Cromo
EBSD	<i>Electron Backscatter Diffraction</i>
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
ex	exemplo
HAZ	<i>Heat Affected Zone</i>
HRC	<i>Hardness Rockwell C</i> (unidade de medida de dureza)
HV	<i>Hardness Vickers</i> (unidade de medida de dureza)
k	quilowatt
kW	quilowatt
LC	<i>Laser Cladding</i>
m	metro
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
min	minuto
mm	milímetro
mN	microNewton
Mo	Molibdênio
N	Newton
Nb	Nióbio
Ni	Níquel
nm	nanometro
s	segundo
SD	<i>Scanning Direction</i>
SEM	<i>Scannig Electron Microscope</i>
TGE	Tamanho de Grão Efetivo

Ti	Titânio
TM	<i>Trademark</i>
vol	volume
W	Watt
ZTA	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

®	Marca registrada
°	Grau
η	Diluição
θ	Ângulo de incidência da onda
λ	Comprimento de onda dos elétrons
ρ_c	Densidade da liga da camada de revestimento
ρ_s	Densidade da liga do substrato

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA.....	17
1.2 OBJETIVOS.....	18
1.2.1 Objetivo geral.....	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 ENGENHARIA DE SUPERFÍCIES.....	19
2.2 <i>LASER CLADDING</i> (LC).....	19
2.2.1 Vantagens e desvantagens do <i>Laser Cladding</i>	21
2.2.2 Potência do Laser.....	22
2.3 REVESTIMENTOS MULTICAMADAS VIA LASER (<i>MULTILAYERED LASER CLADDINGS</i>).....	24
2.4 SUPERLIGA DE REVESTIMENTO – TRIBALLOY T800®.....	26
2.5 SUPERLIGA DA CAMADA INTERMEDIÁRIA DE REVESTIMENTO – HASTELLOY C276®.....	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1 FLUXOGRAMA EXPERIMENTAL.....	30
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS.....	30
3.3 PREPARAÇÃO DO SUBSTRATO.....	31
3.4 DEPOSIÇÃO A LASER.....	32
3.5 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA CARACTERIZAÇÃO.....	33
3.5.1 Eletroerosão a fio.....	33
3.5.2 Processo de corte em seção transversal.....	34
3.5.3 Embutimento metalográfico.....	35
3.6 CARACTERIZAÇÃO DA DILUIÇÃO.....	35
3.7 MICROSCÓPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	36
3.8 DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	36
3.9 ENSAIOS MECÂNICOS.....	37
3.9.1 Ensaio de dureza Vickers.....	37
3.9.2 Ensaio de risco.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	41

4.1 REVESTIMENTOS DEPOSITADOS DE FORMA DIRETA SEM CAMADA INTERMEDIÁRIA.....	41
4.1.1 Macroestrutura.....	41
4.1.2 Microestrutura.....	42
4.1.3 Difração de raios X.....	43
4.1.4 Mapa Químico dos Elementos por EDS.....	44
4.1.5 Diluição.....	45
4.1.6 Dureza.....	46
4.1.7 Ensaio de Risco.....	47
4.2 REVESTIMENTOS COM CAMADA INTERMEDIÁRIA DE LIGA HASTELLOY C276® 49	
4.2.1 Macroestrutura.....	49
4.2.2 Microestrutura.....	51
4.2.3 Difração de Raios X na Camada 02 (Tribaloy T800®).....	55
4.2.4 Mapa Químico dos Elementos da Liga por EDS na Camada 02.....	56
4.2.5 Diluição para a Camada 02.....	57
4.2.6 Dureza da Camada 02.....	57
4.2.7 Resistência ao risco da Camada 02.....	60
5 CONCLUSÃO.....	63
REFERÊNCIAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

Frequentemente componentes mecânicos apresentam desgaste operacional relacionado às condições normais de trabalho. Além do desgaste regular, os componentes podem também estar expostos a ambientes corrosivos, o que pode reduzir ainda mais a vida útil. Holmberg e Erdemir (2017), relataram que a tribologia representa cerca de 23% do consumo global de energia e, destes, 20% estão relacionados ao atrito e 3% aos processos de remanufatura de peças. Segundo Koch et al. (2016), em todo o mundo, o custo estimado anual com falhas decorrentes a corrosão, pode alcançar 2,5 trilhões de dólares. No contexto de sustentabilidade e competitividade industrial, é inquestionável a importância da pesquisa e desenvolvimento na área de engenharia de superfícies.

Existem inúmeros processos dedicados à alteração das propriedades da superfície de componentes em busca de melhor desempenho. Um dos processos para retrabalhar componentes mecânicos desgastados ou mesmo conceber componentes novos com soluções de engenharia de superfícies relacionadas é o *Laser Cladding*. Neste processo, uma liga previamente selecionada é alimentada na forma de pó ou arame e fundida por um feixe de laser, sendo então depositada sobre um substrato. Segundo Yanhua Zhao et al. (2015), esse processo pode ser usado para revestir a superfície de um aço comum de baixo custo, com uma camada de um material mais nobre (ex. superliga), tornando assim, essa superfície menos suscetível à corrosão e ao desgaste abrasivo em condições agressivas de operação.

As superligas são ligas especiais de engenharia largamente utilizadas para a proteção da superfície de componentes ou substratos de menor valor agregado e podem apresentar, como elemento majoritário, o níquel, o ferro ou o cobalto, sendo chamadas de superligas de níquel, de ferro ou de cobalto. A liga conhecida como Tribaloy T800[®] à base de cobalto apresenta um grande interesse para aplicações que envolvem desgaste metal-metal e/ou quando o desgaste está associado a ambientes corrosivos. Contudo, é de conhecimento da comunidade científica a dificuldade de deposição das ligas Tribaloy, incluindo a T800[®] em decorrência da baixa ductilidade (Scheid, 2007) que, por sua vez, advém da elevada fração de fases Laves, fases intermetálicas da natureza frágil, que promovem a formação e a propagação de trincas na liga T800[®]. Portanto, a alta susceptibilidade ao trincamento impede o amplo desenvolvimento de revestimentos de liga Tribaloy T800[®] (Stein, Leineweber; 2021).

Stein, Leineweber; (2021) relataram que a adição de níquel à liga Tribaloy T800[®] deu origem à variante T900, de maior tenacidade e ductilidade, apontando para um potencial caminho para viabilizar a deposição neste sistema de ligas. Sendo assim, identifica-se uma potencial linha de investigação a partir da deposição de uma camada de revestimento tendo o níquel como elemento majoritário e, em seguida, a deposição de uma segunda camada de liga Tribaloy T800[®], a partir de diferentes aportes térmicos (potências de laser), permitindo assim controlar a mistura (diluição) e, potencialmente mitigar o seu trincamento.

O presente projeto propõe a deposição de revestimentos de multicamada, sendo a camada intermediária depositada a partir da superliga Hastelloy C276[®]. Essa liga foi selecionada por apresentar uma boa soldabilidade e elevada ductilidade (Ferreira; Graf; Scheid, 2015; Rivero et al., 2020) e por ter o níquel como elemento base. Já na segunda camada, foi selecionada a superliga Tribaloy T800[®] (superliga de Cobalto – CoCrMoSi) que apresenta dureza elevada e alta dificuldade de deposição sem trincamento (SCHEID, 2007). Finalmente, a estratégia de deposição de multicamadas de revestimento ganha suporte adicional da literatura, já tendo sido referida como uma forma de elevar a espessura de reparo, além de potencialmente mitigar trincamento de revestimentos (DEBROY et al., 2018).

1.1 JUSTIFICATIVA

Diversas pesquisas vêm sendo realizadas a fim de propor modificações nas ligas ou misturas de ligas, com o objetivo de se obter revestimentos com maior resistência ao desgaste e à corrosão e que sejam, ao mesmo tempo, livres de trincas. Uma das abordagens experimentais propõem o processamento de múltiplas camadas com o intuito de obter maior espessura, auxiliando também na redução da tendência ao trincamento de revestimentos (DEBROY et al., 2018). Neste contexto, a deposição a laser da liga Tribaloy T800[®] sobre aço inoxidável AISI 304L revelou alta dureza e resistência ao desgaste (NAVAS, et al., 2006). No entanto, a elevada fração de fases Laves dura e frágil induz ao surgimento e propagação de trincas durante o resfriamento após deposição a laser, impedindo a sua ampla utilização na forma de revestimentos (TOBAR et al., 2008; Stein, LEINEWEBER; 2021). Portanto, o presente projeto propõe a avaliação de revestimentos de dupla camada, sendo a primeira camada de liga de níquel depositada como forma de promover pré-aquecimento e

para que a diluição promova a mistura ou aditivção de níquel, adição que já foi adotada anteriormente para elevar tenacidade da liga T800[®]. Os possíveis impactos da estratégia de deposição serão avaliados tanto sobre a mitigação do trincamento como também sobre as alterações da microestrutura, dureza e resistência ao risco.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o impacto do processamento de revestimentos de dupla camada - sendo uma delas uma camada intermediária de liga de níquel - sobre a tendência ao trincamento, microestrutura e propriedades dos revestimentos de liga Tribaloy T800[®].

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Analisar o efeito da potência do laser sobre a susceptibilidade ao trincamento de revestimentos de liga Tribaloy T800[®].
- b) Caracterizar a diluição na segunda camada liga Tribaloy T800[®] à primeira camada de liga Hastelloy C276[®].
- c) Avaliar o efeito da diluição sobre a microestrutura e fases formadas.
- d) Mapear o efeito da diluição sobre a dureza e resistência ao risco da camada de liga Tribaloy T800[®].

2 REVISÃO DE LITERATURA

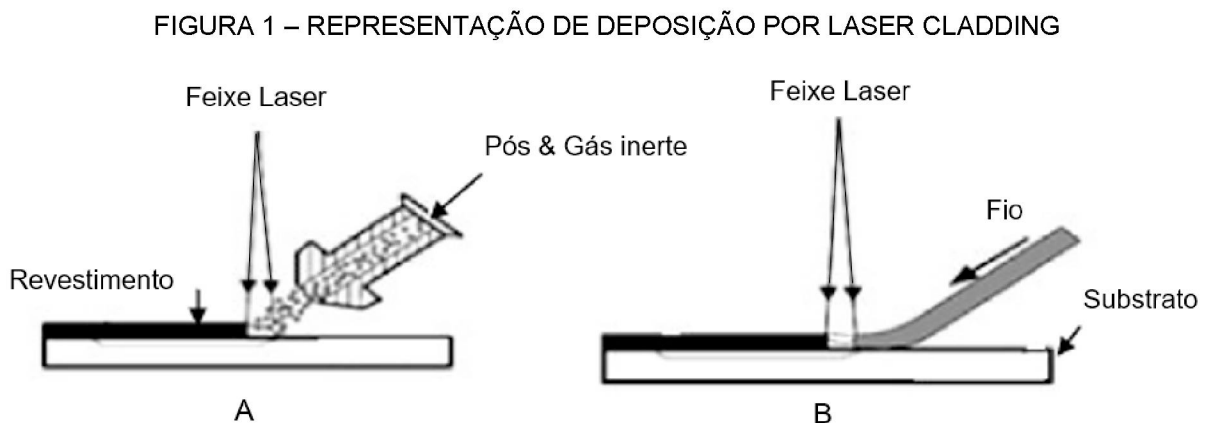
Esta seção apresenta uma revisão sobre o processo de deposição a laser, e sobre as ligas Tribaloy T800® e Hastelloy C276®.

2.1 ENGENHARIA DE SUPERFÍCIES

A engenharia de superfícies abrange todo o campo de pesquisa e atividade técnica voltada para o projeto, fabricação, investigação e utilização de camadas superficiais. As propriedades das camadas superficiais produzidas são avaliadas por métodos utilizados na engenharia de superfícies, usados predominantemente em áreas como: tribologia, proteção contra corrosão, resistência do material, entre outros (Burakowski; Wierzchón, 1999).

2.2 LASER CLADDING (LC)

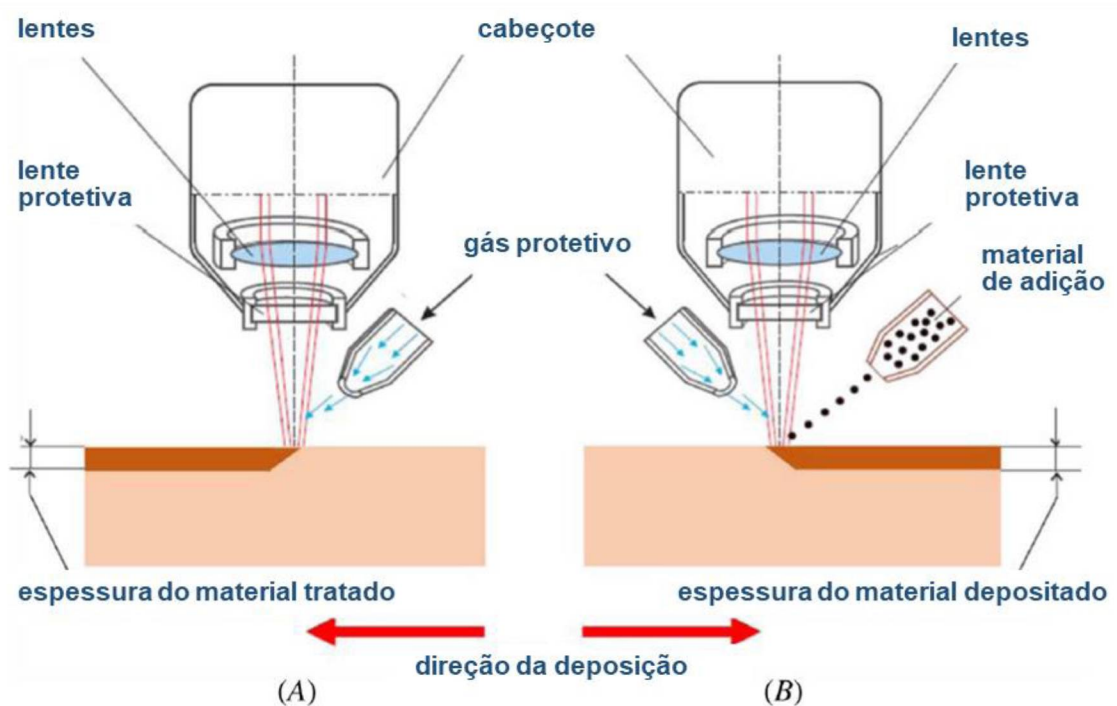
A técnica de deposição de materiais por laser (*Laser Cladding*) consiste em produzir revestimentos sobre um determinado substrato com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas superficiais ou retrabalhar componentes desgastados recuperando as suas dimensões. O laser é a energia utilizada no processo para fundir o material que está sendo adicionado na forma de pó ou arame, conforme mostra a FIGURA 1.



FONTE: Adaptado de Souto (2013).

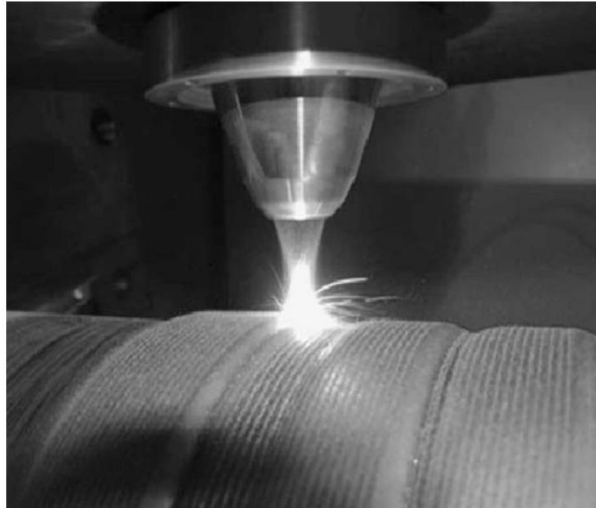
O feixe de laser é direcionado ao substrato que receberá o material que será adicionado, aquecendo essa superfície e simultaneamente o material de adição, promovendo a fusão de ambos. Uma certa diluição ou mistura do material de adição e do substrato é decorrente da fusão que promove a formação da poça (metal líquido) que, posteriormente, resfria até a temperatura ambiente, apresentando união metalúrgica. A FIGURA 2 apresenta um esquema mais detalhado da deposição a laser onde, em (a), o laser está simplesmente tratando a superfícies e, em (b), o laser está servindo como fonte de energia para a fusão de um material de adição que é depositado sobre um substrato (Dobrzanski; Dobrzanska-Danikiewicz, 2019).

FIGURA 2 – LASER (a) UTILIZADO NO TRATAMENTO SUPERFICIAL E (b) NA DEPOSIÇÃO DE UM MATERIAL SOBRE UM SUBSTRATO



FONTE: Adaptado de Dobrzanski; Dobrzanska-Danikiewicz (2019).

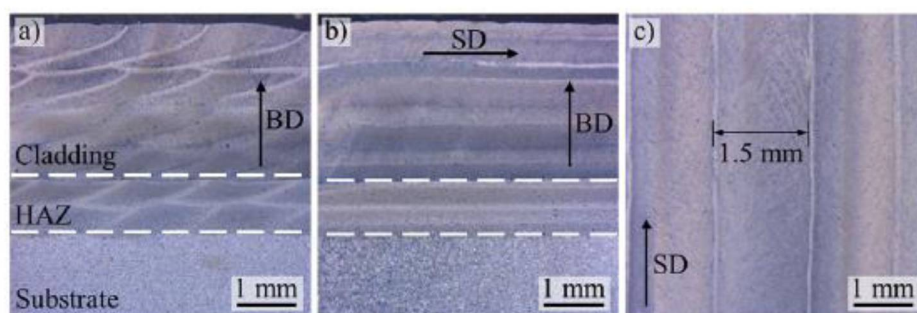
A FIGURA 3 mostra o exemplo de um material sendo depositado em uma superfície cilíndrica em diversas camadas pelo processo de laser cladding, exemplificando a possibilidade da recuperação da superfície de um material desgastado ou simplesmente para o aumento da espessura / revestimento de um determinado componente (Nowotny; Scharek; Beuer; Richter, 2007).

FIGURA 3 – EXEMPLO DA DEPOSIÇÃO DE METAL PELO PROCESSO DE LASER *CLADDING*

Fonte: Nowotny (2007).

A FIGURA 4 apresenta o aspecto macroscópico após um substrato receber a deposição de um material pelo processo de *laser cladding*. É possível observar as linhas de fusão de cada cordão adicionado na parte a e b da figura, assim como a Zona Termicamente Afetada (ZTA ou *HAZ*). Na superfície ortogonal é possível observar a largura obtida nos cordões depositados, nesse caso alcançando cerca de 1,5 mm (Lizzul et al., 2021).

FIGURA 4 – VISTAS DE UM MATERIAL DEPOSITADO POR LASER: (a) TRANSVERSAL, (b) LONGITUDINAL E (c) ORTOGONAL



FONTE: Lizzul et al. (2021).

2.2.1 Vantagens e desvantagens do *Laser Cladding*

O processo de deposição a laser apresenta diversas vantagens, tanto em termos de qualidade do produto final obtido, como quanto à produção industrial. O processo de deposição a laser permite a criação de componentes de geometria

complexa, customizados conforme a necessidade do cliente. Pode-se produzir diretamente a partir de um arquivo CAD, sem recorrer a processos intermediários, permitindo reduzir o tempo de produção e os seus custos associados (Rivero, 2019; Mazunder et al., 2000).

Uma das vantagens da deposição a laser é a possibilidade de adição de mais de um material durante a deposição da matéria-prima, utilizando dois ou mais reservatórios de pó (alimentadores) que podem ser misturados, e ainda é possível criar revestimentos ou componentes com camadas de diferentes materiais e composição variada. Outra vantagem está na capacidade de atingir zonas de difícil acesso, visto que é possível efetuar o processo juntamente com sistemas robotizados de múltiplos eixos (Soares, 2014; Rivero, 2019). O *laser cladding* também possui uma grande vantagem de poder ser utilizado em peças grandes, podendo-se fazer várias camadas e com a possibilidades de variar os materiais que estão sendo depositados, obtendo uma ótima fusão (Lizzul et al., 2021).

O processo de deposição a laser apresenta também algumas desvantagens. A primeira delas é referente ao investimento inicial devido ao elevado custo do equipamento. No entanto, o investimento inicial compensa quando comparado aos tratamentos térmicos e processamentos mecânicos posteriores à deposição da matéria-prima, que são reduzidos ou até mesmo eliminados em alguns casos (Lewis; Schlienger, 2000).

Outra restrição está relacionada à necessidade do controle dos parâmetros do processo. A falta de controle adequado desses parâmetros pode ocasionar distúrbios no processo de deposição e conseqüente comprometimento da qualidade do produto (Soares, 2014).

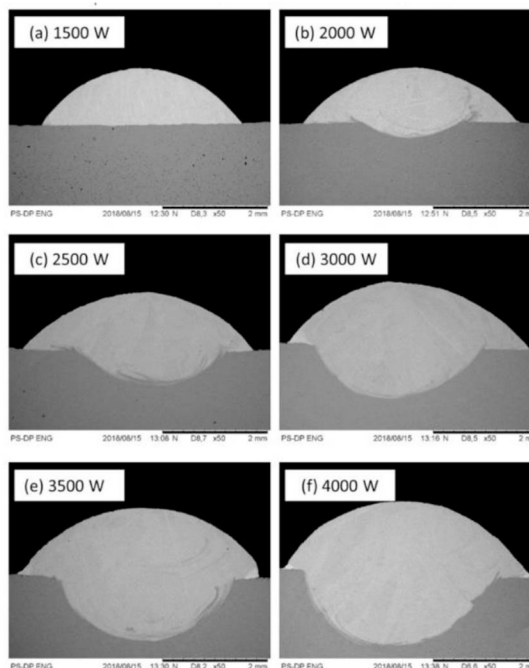
2.2.2 Potência do Laser

No processo de deposição a laser, um dos parâmetros a ser selecionado é a potência do laser. De acordo com estudos anteriores, este parâmetro pode afetar diversas características do revestimento tendo uma influência muito grande na qualidade do acabamento superficial obtida.

Rivero et al. (2020), realizou estudo sobre a deposição a laser da liga Hastelloy C276® em Aço Inoxidável AISI 304L e Ferro Fundido Nodular Ferrítico GGG40. Os revestimentos foram depositados a laser com potências dentro da faixa

de 1,0 e 4,0 kW com incrementos de 0,5 kW. Depósitos processados com 1,0 kW se mostraram sem adesão. A partir da potência de 1,5 kW observou-se boa adesão, justificando a caracterização dos revestimentos. De acordo com Rivero (2019), foram observadas diferenças significativas na geometria dos cordões depositados de acordo com a potência de laser aplicada, que variou de 1,5 kW até 4,0 kW, conforme pode ser observado na FIGURA 5. O mesmo estudo mostrou, através da avaliação da largura dos cordões de revestimento, uma tendência geral de aumento da largura dos cordões à medida que a potência do laser é elevada. Os resultados mostraram que, conforme a potência é aumentada, a largura tende a se aproximar do valor nominal da mancha focal do laser. Também foi observado que, para o substrato de Aço Inoxidável AISI 304L, houve um aumento progressivo da eficiência da fusão do pó atomizado com o aumento da potência do laser.

FIGURA 5 – MACROGRAFIAS DOS CORDÕES DE LIGA HASTELLOY C276® DEPOSITADOS SOBRE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304L COM POTÊNCIAS ENTRE 1,5 E 4,0 kW



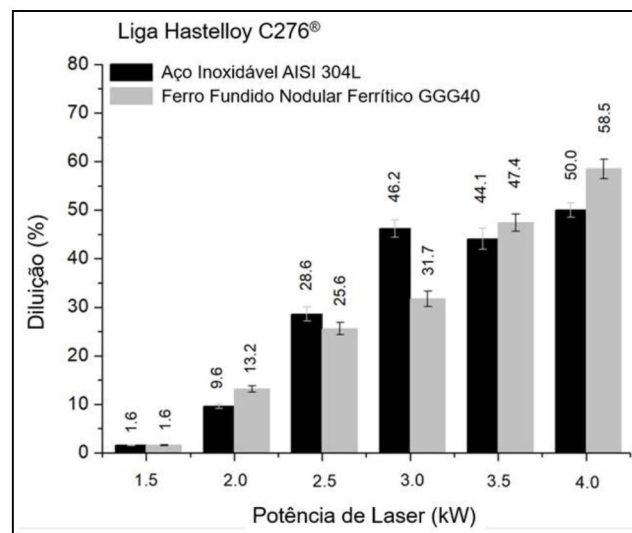
FONTE: Rivero (2019).

Pizzatto (2020) fez um estudo similar de deposição a laser em que, na primeira abordagem, foram feitos revestimentos de múltiplos cordões de liga Hastelloy C276® com potências de laser de 1,5, 2,0 e 2,5 kW sobre substratos de AISI 304L e GGG40. Na segunda abordagem, foram depositados revestimentos compósitos (matriz metálica de liga Hastelloy C276® reforçada com carboneto de nióbio), na forma de

cordões únicos com potência de laser de 1,5 e 3,0 kW sobre o substrato AISI 304L. A análise dos resultados revelou variada fusão do substrato para as diferentes potências adotadas. Nos revestimentos de múltiplos cordões, observou-se uma fusão mínima do substrato para os revestimentos depositados com potência de laser de 1,5 kW; enquanto para a potência de 2,0 kW observou-se a partir do terceiro cordão uma maior fusão do substrato; já para a potência de 2,5 kW uma fusão do substrato mais notável foi observada. Neste mesmo estudo pode-se observar que a potência do laser afetou diversos aspectos, como ângulo de molhabilidade, diluição da liga e, portando, a dureza dos revestimentos, entre outros aspectos.

A potência do laser é um dos parâmetros que influencia o aporte térmico e, desta forma, também a diluição ao substrato. Rivero et al. (2020) mostrou que quanto maior a potência do laser, maior a diluição, conforme pode ser observado na FIGURA 6.

FIGURA 6 – DILUIÇÃO TÍPICA PELO MÉTODO DE TOYSERKANI



FONTE: Adaptado de Rivero (2020).

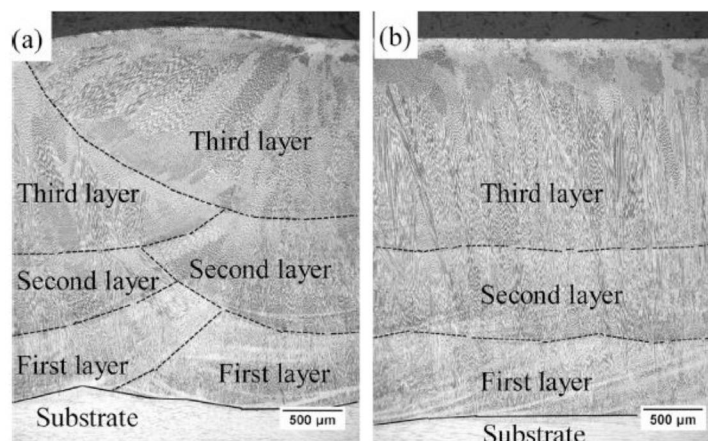
2.3 REVESTIMENTOS MULTICAMADAS VIA LASER (*MULTILAYERED LASER CLADDINGS*)

Esta seção trata rapidamente da deposição de materiais a laser na forma de múltiplas camadas. Segundo Vundru (2018), diferente de muitas técnicas de reparo utilizadas, o *laser cladding* é um processo que pode ser localizado e preciso, podendo ser facilmente automatizado. A deposição de multicamadas vem sendo utilizada em

vários cenários, como em reparo de pistões, rolamentos, lâminas de rotores, eixos e engrenagens. Muitos estudos vêm sendo realizados no que diz respeito às diferenças entre uma única camada de revestimento e várias e já é possível encontrar casos em que uma melhor performance em desgaste é encontrada em revestimentos multicamadas (Li et al., 2015; Lou et al., 2019; Lizzul et al., 2021). Lizzul et al. (2021) acrescentam que, quando se deposita mais de uma camada, o revestimento passa por múltiplos ciclos térmicos que podem melhorar a qualidade do revestimento depositado, sua microestrutura e até mesmo sua usinabilidade.

Li et al. (2015) estudou as propriedades mecânicas de um aço inoxidável 308L depositado por multicamadas em um aço inoxidável 316L, onde três camadas foram depositadas. Os autores observaram colunas dendríticas partindo do material que foi adicionado, em direção ao material de base (FIGURA 7). A média dos valores de dureza medidos nas primeira, segunda e terceira camadas foram 242 HV, 234 HV e 233 HV respectivamente, e as diferenças entre os valores foi atribuída ao tamanho de grão ou grau de refino microestrutural de cada camada.

FIGURA 7 – MICROESTRUTURA DE UMA SEÇÃO DE MULTICAMADAS COM CORTES:
(a) TRANSVERSAL e (b) LONGITUDINAL

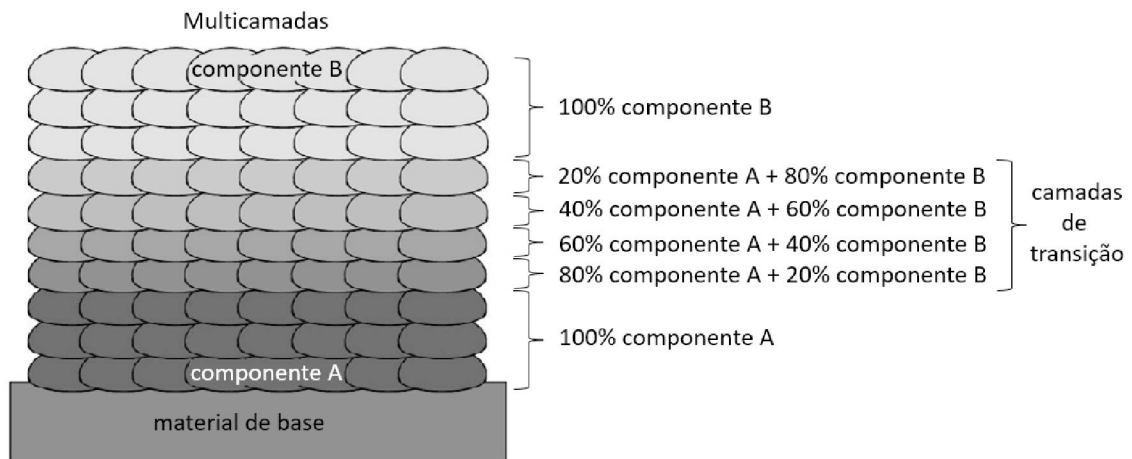


Fonte: Li et al. (2015).

Ocylok, Weisheit e Kelbassa (2010) investigaram a deposição de multicamadas em ferramentais fundidos em alumínio e em determinadas regiões de moldes, e observaram que o ferramental apresentou trincas prematuras onde havia altas tensões devido a ciclos térmicos da soldagem. A partir daí, adicionaram um material mais resistente pelo processo a *laser*. Uma única camada seria o suficiente para atender às propriedades desejadas (dureza, resistência à corrosão e resistência

à choque térmico) porém, a grande diferença entre o material do molde e o material de adição poderia causar falhas por fadiga prematuras. Portanto, um material com maior ductilidade foi depositado nas primeiras camadas, e a composição foi sendo alterada de forma gradativa até a composição do material desejado na última camada, conforme mostra a FIGURA 8.

FIGURA 8 – ESQUEMA DE DEPOSIÇÃO NA FORMA DE MULTICAMADAS



Fonte: Adaptado de Ocylok, Weisheit e Kelbassa (2010).

2.4 SUPERLIGA DE REVESTIMENTO – TRIBALLOY T800®

A liga Triballoy T800® é uma liga de cobalto composta por CoMoCrSi com uma excelente resistência à corrosão e desgaste, além de boa resistência mecânica. O QUADRO 1 apresenta a composição química da liga e suas propriedades físicas (Mankins; Lamb, 1992; Deloro, 2023).

A Triballoy T800® é uma liga bifásica a base de cobalto que oferece uma excelente combinação de resistência ao desgaste e à corrosão. Possui fases intermetálicas de Laves de elevada dureza, alcançando valores de ~900 HV, tornando a liga capaz de resistir ao desgaste mesmo em condições agressivas de trabalho como falta de lubrificação e temperaturas elevadas até cerca de 1000°C. A liga depositada pode ser usinada com ferramentas à base de carbeto tungstênio e lixadas ou polidas com o auxílio de abrasivos à base de carboneto de silício ou alumina, podendo-se obter uma superfície com um excelente acabamento (Alloy Digest, 1975).

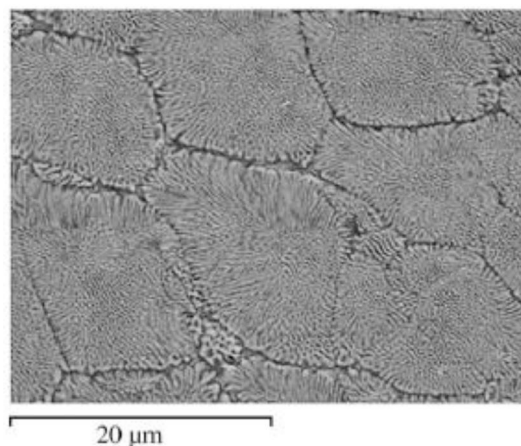
QUADRO 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES DO TRIBALLOY T800®

Composição Química (%w.t.)	
Mo - 29 Cr - 17,5 Si - 3,5	C - 0,08 (máx) Co - Bal.
Propriedades	
Dureza	58 HRC
Densidade	8,6 g/cm ³
Ponto de Fusão	1290 - 1350°C
Coefficiente de Expansão Térmica	12,6 µm/m.°C (20 - 500°C)
Coefficiente de Expansão Térmica	15,1 µm/m.°C (20 - 1000°C)
Tensão de Ruptura	710 MPa
Condutividade Térmica	14,3 W/m.K

FONTE: Adaptado de Mankins; Lamb (1992) e Deloro (2023).

Comparada com outras ligas da família Triballoy, a liga T800® oferece uma performance superior, em decorrência da maior fração volumétrica de fases Laves primárias. De acordo com Navas (2006), essa fase ocorre devido ao Molibdênio (Mo) e Silício (Si) adicionados em quantidades que excedem sua solubilidade, sendo essa bastante abundante na liga (35 – 70% do volume). No entanto, em consequência da alta dureza dessas fases, pode ocorrer o trincamento durante a fabricação, impedindo a sua utilização na forma de revestimentos (Stein, Leineweber; 2021). O processo de deposição à laser está associado a elevadas taxas de resfriamento do material depositado, agravando a tendência ao trincamento devido às elevadas tensões térmicas de deposição. A FIGURA 9 mostra o aspecto da microestrutura da liga, destacando a solidificação celular eutética (Tobar et al., 2008).

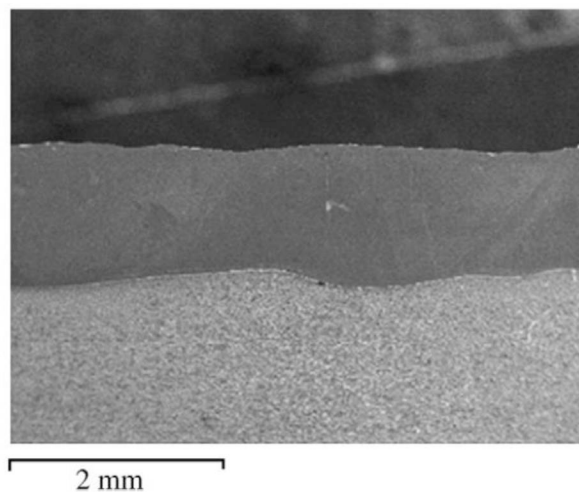
FIGURA 9 – MICROESTRUTURA DA LIGA TRIBALLOY T800®



Fonte: Tobar et al. (2008).

Segundo Tobar et al. (2008), as boas propriedades mecânicas obtidas dessa liga, assim como as preocupações ambientais existentes em torno do revestimento de cromo duro, fazem desse material uma excelente alternativa para peças mecânicas que requerem altas resistências à desgaste e corrosão. Navas et al. (2006) complementam que as ligas de cobalto se destacam pela resistência ao desgaste, em especial a liga T800[®], mesmo apresentando limitações em termos de ductilidade e resistência ao impacto na condição como depositada. Tobar et al. (2008) também registram a susceptibilidade da liga T800[®] a trincas e citam o desenvolvimento de uma nova liga da mesma família, a Tribaloy T900[®]. O referido trabalho sugere que, a partir do aumento do teor de Ni da liga (ou a redução de Co e Mo), é possível aumentar a ductilidade do material, assim reduzindo a tendência ao trincamento. A FIGURA 10 mostra um corte transversal realizado em um substrato de aço inoxidável AISI A304L onde a liga T800[®] foi depositada. É possível observar uma microestrutura densa e livre de porosidade, com uma junção fina e uniforme no material de base (Tobar et al., 2008).

FIGURA 10 – CORTE TRANSVERSAL DE UMA LIGA TRIBALOY T800[®] DEPOSITADA A LASER



Fonte: Tobar et al. (2008).

2.5 SUPERLIGA DA CAMADA INTERMEDIÁRIA DE REVESTIMENTO – HASTELLOY C276[®]

A liga Hastelloy C276[®] apresenta o níquel como elemento majoritário, apresentando nominalmente NiCrMoW. Possui um teor de carbono baixo, assim

evitando a formação de carbonetos, pois esses apresentam efeito deletério na resistência à corrosão e na tenacidade da liga. O QUADRO 2 apresenta a composição química da liga e suas principais propriedades físicas (Mankins; Lamb, 1992).

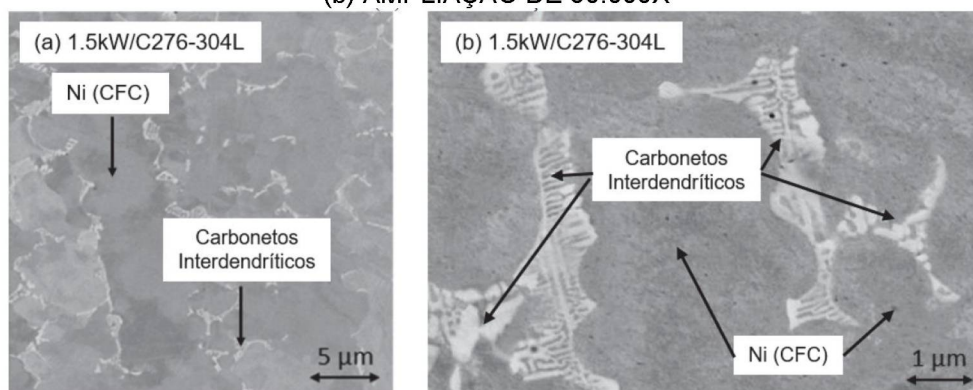
QUADRO 2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES DO HASTELLOY C276®

Composição Química (%w.t.)	
Mo - 15...17	Mn - 1
Cr - 14,5...16,5	Si - 0,08
Fe - 4...7	C - 0,01
W - 3...4,5	V - 0,35
Co - 2,5	Ni-Bal.
Propriedades	
Densidade	8,89 g/cm ³
Ponto de Fusão	1325 - 1370°C
Coefficiente de Expansão Térmica	11,2 µm/m.K (20 - 100°C)
Condutividade Térmica	9,8 W/m.K
Limite de escoamento	355 MPa
Tensão de Ruptura	790 MPa
Módulo de Elasticidade	205 GPa

FONTE: Adaptado de Mankins; Lamb (1992).

Carbonetos interdendríticos de Cr poderão ser observados na deposição dessa liga, podendo apresentar M_7C_3 e $M_{23}C_6$, dependendo do material de base. Ferreira, Graf e Scheid (2015) e Rivero et al. (2020) atribuíram a formação de M_7C_3 às maiores taxas de resfriamento no substrato do ferro fundido e o $M_{23}C_6$ às menores taxas de resfriamento do aço inoxidável. É possível observar o aspecto dessa formação através de uma metalografia conforme observado na FIGURA 11.

FIGURA 11 – MICROESTRUTURA DA LIGA HASTELLOY C276® (a) AMPLIAÇÃO DE 5.000X, (b) AMPLIAÇÃO DE 30.000X



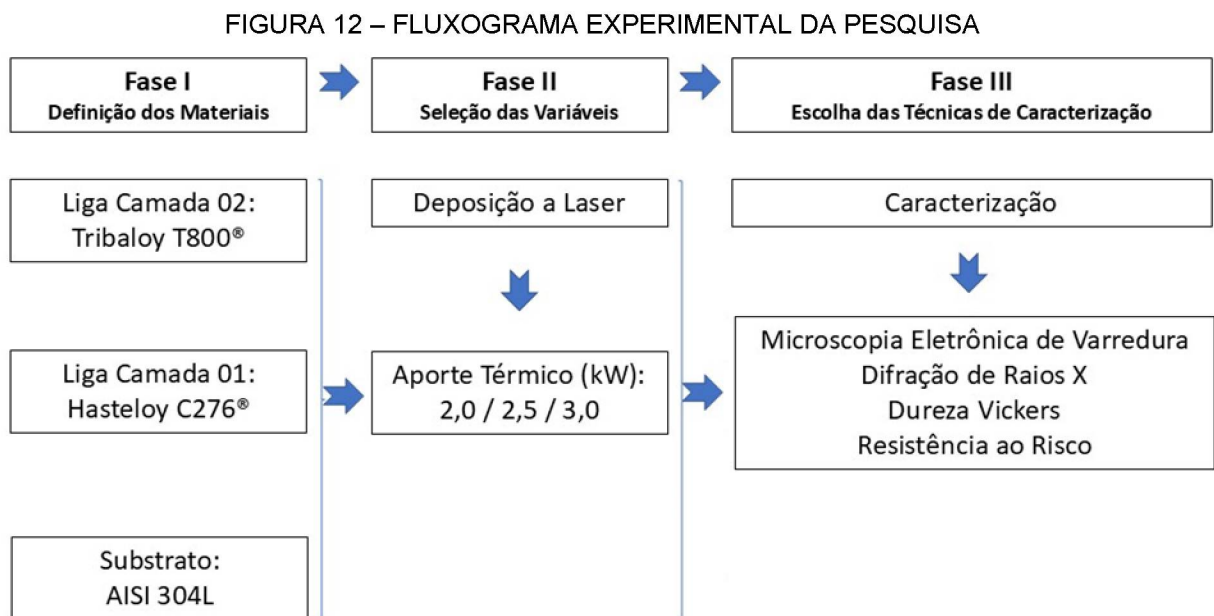
Fonte: Adaptado de Rivero et al. (2020).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, são apresentados o fluxograma de pesquisa, os principais materiais e os processos, bem como os parâmetros adotados na deposição dos revestimentos com camada intermediária.

3.1 FLUXOGRAMA EXPERIMENTAL

A FIGURA 12 apresenta o fluxograma da pesquisa, detalhando as principais condições experimentais e avaliações propostas.



FONTE: O Autor (2023).

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

O presente estudo avaliou a liga Tribaloy T800® como liga de deposição da camada 02 e a liga Hasteloy C276® como liga da camada 01 (intermediária). As ligas na forma de pó atomizado a gás, apresentaram tamanho de partículas de 53 a 150 μm . Os pós foram depositados em um centro de deposição de laser de diodo de alta potência em placas de aço inoxidável AISI 304L de 12 mm de espessura.

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS LIGAS

Material	Composição química (%)					
	Ni	Cr	Mo	C	Si	W
Liga Principal						
Tribaloy T800®	Bal.	17,5	28,5	<0,1	3,5	Ni, Fe
Material Aditivação	C	Cr	Mo	C	Si	Outros
Hastelloy C276®	Bal.	14,5	15,9	0,1	0,6	4,5

FONTE: O autor (2023).

A liga Tribaloy T800® foi escolhida devido ao interesse para aplicações envolvendo desgaste metal-metal e em ambientes corrosivos agressivos e pelo desafio de processamento na forma de revestimentos identificado na literatura (Stein, Leineweber; 2021). Já a liga Hastelloy C276® foi selecionada para camada intermediária (camada 01) por seu elevado teor de níquel e facilidade de processamento.

O substrato AISI 304L foi selecionado pela ampla aplicação industrial, sendo de interesse da indústria adotar revestimentos para os casos em que os componentes estiverem expostos a meios corrosivos, conforme TABELA 2.

TABELA 2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO SUBSTRATO

Material do Substrato	Composição Química (Wt %)								
	Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	N
AISI 304L	Bal.	0,021	0,44	1,3	18,15	8,02	0,035	0,001	0,047

FONTE: Certificado Grupo Aperam América do Sul S.A.

3.3 PREPARAÇÃO DO SUBSTRATO

Antes da deposição a laser é necessário fazer a preparação do substrato. Foram adotadas três etapas para a preparação da superfície, conforme segue:

- Preparação: as chapas dos substratos foram usinadas a fim de assegurar as superfícies planas e então retificadas até a espessura de 12 mm para o AISI 304L;
- Corte: as chapas foram então cortadas em tamanho menor a fim de facilitar o manuseio e o processo de disposição;
- Preparação fina da superfície: depois de retificadas, todas as placas passaram por processo de jateamento.

3.4 DEPOSIÇÃO A LASER

O processo de deposição usado nesse trabalho foi o *laser cladding* com um sistema duplo de alimentador de pó. Isto permite a alimentação intercalada de até 2 tipos diferentes de ligas, o que permite a produção de multicamadas de composição distinta. O laser usado é de diodo de alta potência (comprimento de onda entre 980 e 1060 nm) conduzido por fibra ótica até o cabeçote, com potência máxima de 7 kW.

TABELA 3 – PARÂMETROS DE REVESTIMENTO CONTROLADOS

Condição	#1	#2	#3
Potência (kW)	2,0	2,5	3,0
Liga Camada 02		Tribaloy T800®	
Liga Camada 01		Hastelloy C276®	
Substrato		AISI 304L	
Taxa de Alimentação do Pó (g/min)		30	
Velocidade de Avanço (mm/min)		800	
Percentual de Sobreposição (%)		30	
Distância Focal (mm)		20	
Diâmetro do Ponto Focal (mm)		5	
Gás de Proteção e Arraste (LMin ⁻¹)		8,0	

FONTE: O Autor (2023).

FIGURA 13 – EQUIPAMENTO DE DEPOSIÇÃO A LASER UTILIZADO



FONTE: Rivero (2019).

O equipamento usado para a deposição foi da marca PRECO, modelo SL 9000 Series® (FIGURA 13). O equipamento está instalado no Instituto SENAI de Inovação em Joinville, Santa Catarina, em uma sala que possui controle de temperatura e umidade. A unidade de deposição possui um painel com controle numérico que controla a mesa nos eixos x-y e o deslocamento da tocha no eixo z, permitindo o preciso ajuste de parâmetros como velocidade de deposição e percentual de sobreposição de cordões.

3.5 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA CARACTERIZAÇÃO

3.5.1 Eletroerosão a fio

A eletroerosão a fio é um processo de usinagem na qual as amostras foram seccionadas por eletroerosão para a retirada dos cordões do substrato revestido e redução do tamanho da amostra. Neste processo, a peça permanece submersa em um líquido e, conseqüentemente, acontece a rápida dissipação do calor gerado durante as descargas elétricas aplicadas para o corte ou separação das partes. Da mesma forma, alterações induzidas por ação mecânica são também mitigadas. O equipamento utilizado para a realização do processo foi a ROBOFIL 290P® do fabricante Charmilles (FIGURA 14).

FIGURA 14 – EQUIPAMENTO DE CORTE POR ELETROEROSÃO CHARMILLES ROBOFIL 290P®



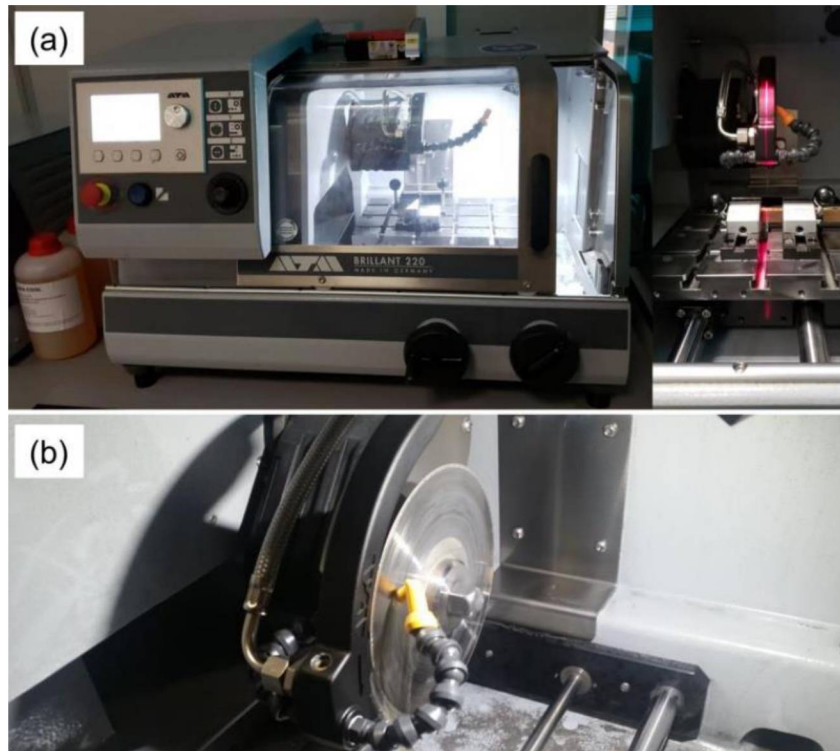
FONTE: Rivero (2019).

3.5.2 Processo de corte em seção transversal

O processo de corte é realizado na seccionadora de precisão modelo Brillant 220[®], do fabricante ATM, que opera com 3 eixos (x, y e z) em cortes cruzados e possui diversos programas de corte (FIGURA 15). Possui abertura frontal e iluminação interna por lâmpadas led com refrigeração líquida. O equipamento é controlado de forma automatizada ou por joystick e display externo, podendo ainda ter seus parâmetros alterados durante a execução do processo e gravação dos programas para repetição em escala.

Neste estudo foi utilizado disco diamantado com 0,4 mm de espessura e aditivo de corte e refrigeração para corte da marca AKA-COOL[®]. Como parâmetros de corte foram utilizados uma rotação de 500 rpm e avanço de 0.05 mm/s. Desta forma, foi obtido um corte preciso e com um mínimo de alteração das amostras.

FIGURA 15 – SECCIONADORA BRILLANT 220[®]



FONTE: Rivero (2019).

3.5.3 Embutimento metalográfico

Após o corte, as amostras foram embutidas a quente em resina polimérica do tipo baquelite. O equipamento utilizado foi modelo OPAL 410® do fabricante QATM (FIGURA 16). Consiste de uma prensa hidráulica de embutimento a quente refrigerada a água. Seu processo é automatizado, previamente configurado, e controlado pelo display do equipamento. Possui um conjunto de moldes, com diâmetros de 25 até 40 mm, que podem ser trocados de forma manual. Duas amostras podem ser embutidas simultaneamente. O equipamento dispõe de seis pressões diferentes que podem ser selecionadas, além da pressão de operação padrão para cada tamanho de molde. O aquecimento da prensa é realizado através de quatro resistências, com potência de 500 W cada uma, atingindo a temperatura configurada, que pode variar de 20 a 200°C.

FIGURA 16 – EQUIPAMENTO DE EMBUTIMENTO A QUENTE OPAL 410® - QATM



FONTE: Adaptado de Rivero (2019).

3.6 CARACTERIZAÇÃO DA DILUIÇÃO

Para se calcular a diluição dos revestimentos, para a liga de cobalto depositada diretamente no substrato, foi adotado o teor de ferro. Já para o material depositado com a camada intermediária, foi adotado o teor de níquel, ao invés do teor de ferro normalmente utilizado no método de Toyserkani, equação (1).

$$\eta = \frac{\rho_c(X_{c+s} - X_c)}{\rho_s(X_s - X_{c+s}) + \rho_c(X_{c+s} - X_c)} \quad (1)$$

Onde, a partir da adaptação, utilizou-se o teor de níquel (ou ferro):

η é a diluição

ρ_c é a densidade da liga da camada de revestimento

ρ_s é a densidade da liga do substrato

X_s é o teor de níquel (ou ferro) da liga do substrato

X_c é o teor de níquel (ou ferro) da liga de revestimento

X_{c+s} é o teor de níquel (ou ferro) da liga de revestimento após a deposição

3.7 MICROSCÓPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A análise da microestrutura foi realizada pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Nesta técnica, imagens podem ser obtidas com uma grande gama de ampliações, as quais também foram utilizadas para a análise da geometria dos cordões obtidos e para a medição do teor de Níquel (EDS) utilizado no cálculo da diluição pelo método de Toyserkani.

A análise química semiquantitativa conhecida por EDS (*Energy Dispersive Spectrometry*), foi adotada para a avaliação dos percentuais dos principais elementos nas amostras depositadas. Seu princípio de funcionamento se dá pela leitura da energia em forma de raios X característicos, emitida pelos elementos da amostra excitados pelo feixe de elétrons principal. Esse tipo de espectrometria permite alguns tipos diferentes de análises entre eles: mapeamento, análise de área, ponto ou varredura em linha.

A análise microestrutural foi realizada no Centro de Microscopia Eletrônica (CME), no Campus Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR), a partir da análise semiquantitativa por EDS e imagens da microestrutura dos revestimentos.

3.8 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Análises por difração de raios X foram utilizadas para identificar as fases formadas nos revestimentos das amostras. As varreduras foram realizadas diretamente na superfície de topo dos depósitos. Para as análises, utilizou-se a radiação K- α Cr, faixa angular de varredura de 30° a 165° e a radiação K- α Cu com

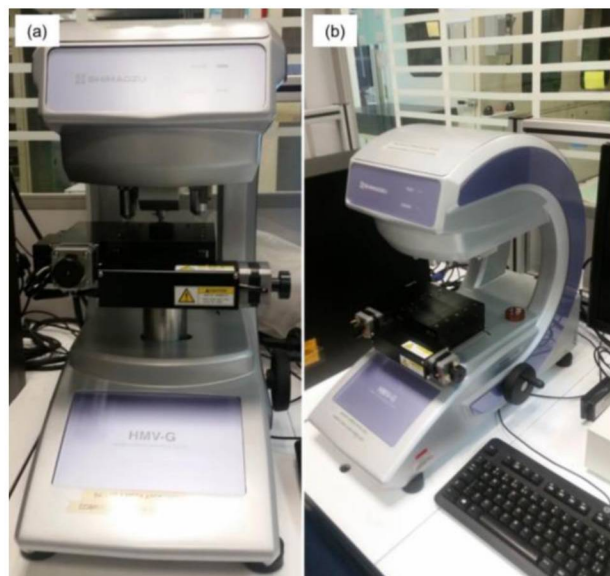
varredura 2θ de 20° a 120° , passo angular de $0,05^\circ$ e tempo de exposição por canal de 1s. Foi utilizado um difratômetro marca GE Sensing & Inspection GmbH, modelo Seifert Charon XRD M – Research Edition para as varreduras, enquanto a análise dos picos de difração foi realizada a partir do software Crystallographica Search Match.

3.9 ENSAIOS MECÂNICOS

3.9.1 Ensaio de dureza Vickers

O ensaio de dureza Vickers tem como objetivo avaliar a influência da intensidade do laser e do tipo de substrato sobre os revestimentos. O equipamento utilizado é do fabricante Shimadzu, modelo HMV-G Series® (FIGURA 17).

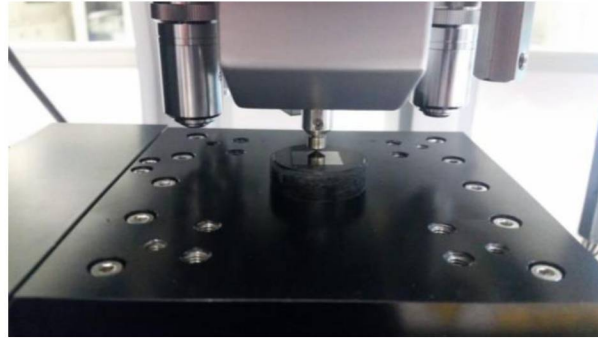
FIGURA 17 – EQUIPAMENTO UTILIZADO NO ENSAIO DE DUREZA VICKERS HMV-G SERIES®



FONTE: Rivero (2019).

O durômetro do equipamento opera de forma automatizada quanto à medição das diagonais das indentações, reduzindo os erros de medição (FIGURA 18). Apresenta os eixos x e y motorizados para movimentação da amostra. O equipamento dispõe de 3 lentes de ampliação (10x, 40x e 50x) que se ajustam automaticamente conforme a necessidade de recuo para perfeito enquadramento da área impressa pelo indentador, permitindo ampliação, conforme necessidade.

FIGURA 18 – INDENTADOR E LENTES DO EQUIPAMENTO HMV-G SERIES®

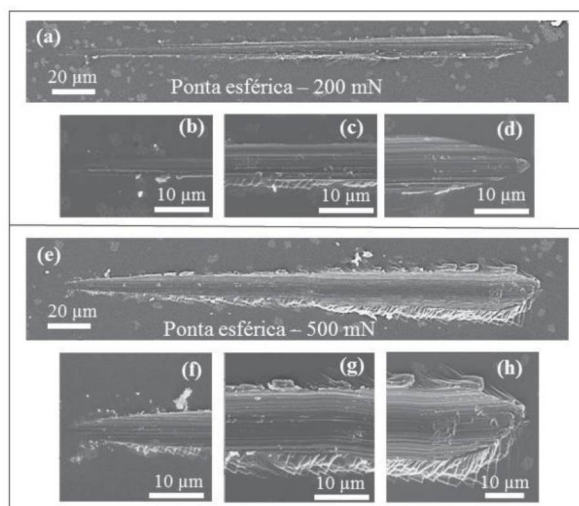


FONTE: Rivero (2019).

3.9.2 Ensaio de risco

O ensaio de risco pode ser utilizado para avaliar a adesão de um filme ao substrato, mecanismos de falhas de materiais e deformações elásticas e plásticas. A resistência ao risco é geralmente relacionada com a capacidade de um determinado material resistir à abrasão sem fraturar. Nesse teste, é possível aumentar gradativamente a força aplicada em um indentador, à medida que esse se desloca em um determinado eixo, podendo-se determinar qual é a carga crítica em que a superfície falha (Luz, 2019). A FIGURA 19 traz um exemplo onde o ensaio de risco foi realizado em uma liga Ti-35Nb com cargas de 0-200 mN (a) e 0-500 mN (e), com suas imagens aumentadas em (b,c,d) e (f,g,h) respectivamente, nesse caso utilizando um penetrador esférico de 6 μm de diâmetro.

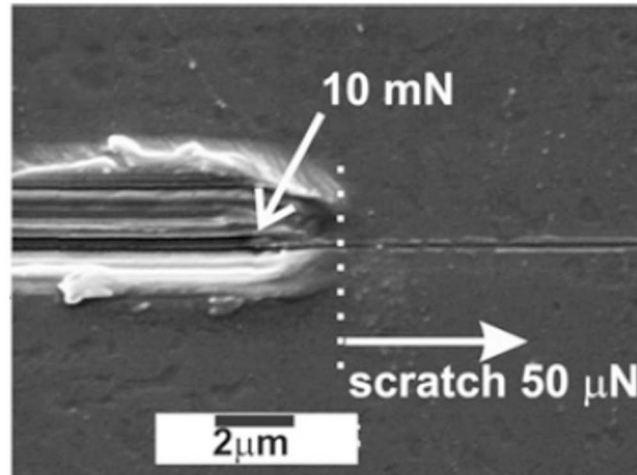
FIGURA 19 – ENSAIO DE RISCO COM INDENTADOR TIPO ESFÉRICO



Fonte: LUZ (2019).

Lepienski et al. (2011) também realizaram ensaios de risco em uma superfície bioativa de titânio, contudo utilizando um indentador do tipo Berkovich, e cargas de 0-10 mN, conforme observado na FIGURA 20.

FIGURA 20 – ENSAIO DE RISCO COM INDENTADOR TIPO BERKOVICH

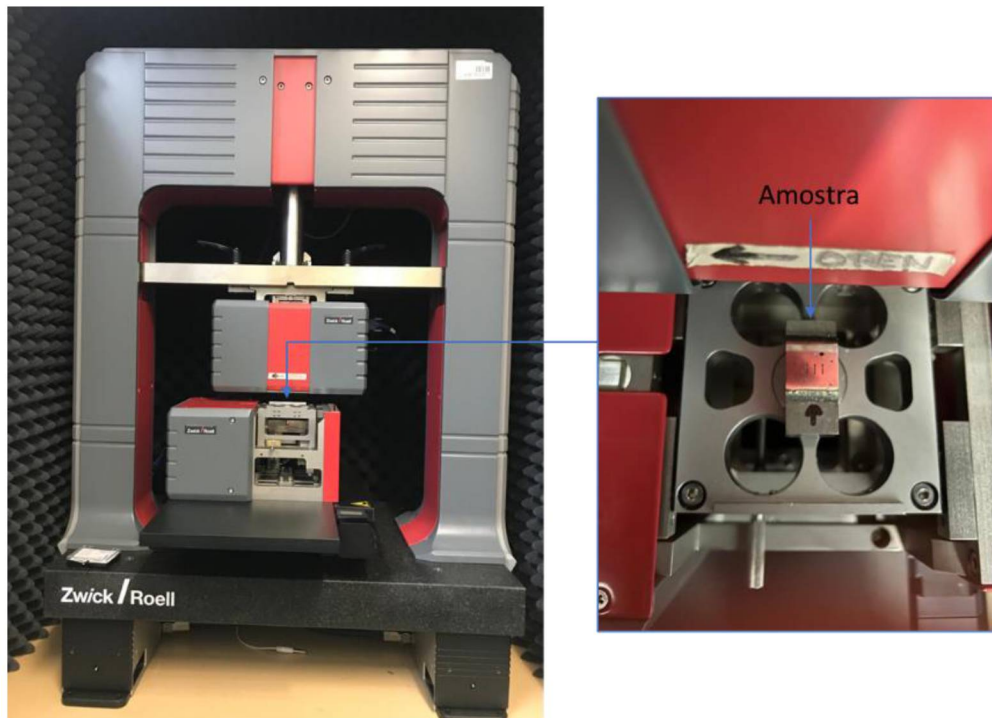


Fonte: Lepienski et al. (2011).

Diferentemente da avaliação de filmes finos, a presente investigação utilizou ensaios de risco para avaliar as diferenças na microestrutura dos revestimentos, decorrentes da utilização de diferentes potências de laser e da adoção de camada intermediária. Os ensaios de risco foram realizados em um equipamento UNAT do fabricante Zwick Roell®, conforme mostra a FIGURA 21.

Foram realizados três riscos em cada amostra com um indentador esférico de diamante com diâmetro de 100 μm . A carga utilizada foi de 1000 mN e comprimento de risco de 80 μm para um total de 20 ciclos de riscamento. Adicionalmente, foram preparadas imagens por microscopia eletrônica de varredura dos riscos visando auxiliar na comparação das diversas condições avaliadas. Os resultados foram tratados em termos de profundidade total do risco e comparados para cada condição estudada.

FIGURA 21 – EQUIPAMENTO MARCA UNAT ZWICK ROELL®



FONTE: O Autor (2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

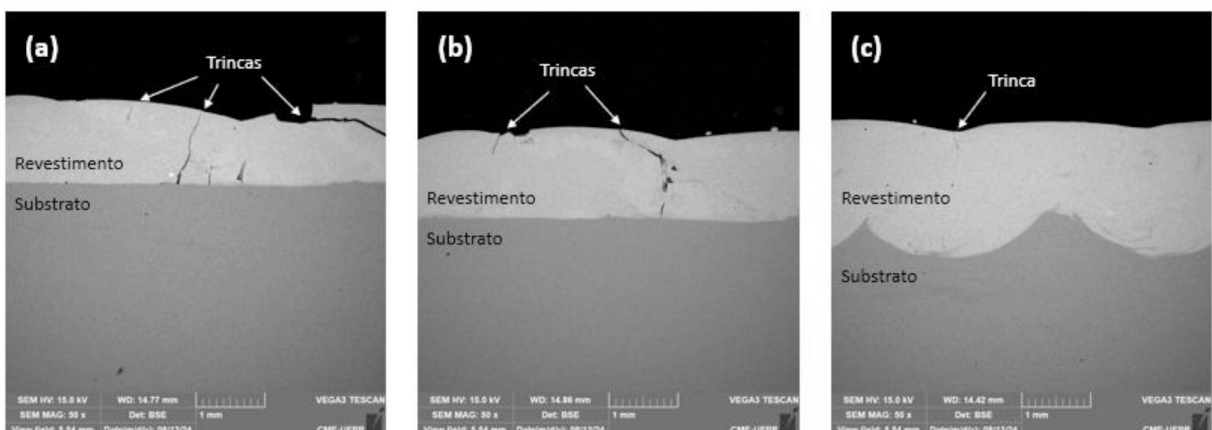
Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos referente à deposição (1) da liga de cobalto (Tribaloy T800[®]) depositada de forma direta e, (2) da liga de cobalto sendo depositada em multicamadas, sendo acrescentada uma camada intermediária de níquel (Hastelloy C276[®]) entre o substrato e a segunda camada.

4.1 REVESTIMENTOS DEPOSITADOS DE FORMA DIRETA SEM CAMADA INTERMEDIÁRIA

4.1.1 Macroestrutura

É possível observar na FIGURA 22 a presença de trincas em todas as potências de laser utilizadas na deposição do material Tribaloy T800[®] de forma direta sobre o substrato. Mesmo em uma potência maior, onde proporciona-se uma maior diluição, é possível de observar a presença de trincas, embora em menor quantidade. Tobar et al. (2008) concluiu em seu estudo da deposição a laser da mesma liga T800[®] em um substrato AISI 304L, que mesmo em altas diluições, não foi possível observar uma deposição livre de trincas. A natureza frágil das fases Laves promovem a formação e propagação de trincas nesse material, ao ser depositado (Stein, Leineweber; 2021).

FIGURA 22 – MACROGRAFIA DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS DE FORMA DIRETA DE TRIBALOY T800[®] PURA EM POTÊNCIAS DE (a) 2,0 kW, (b) 2,5 kW e (c) 3,0 kW.

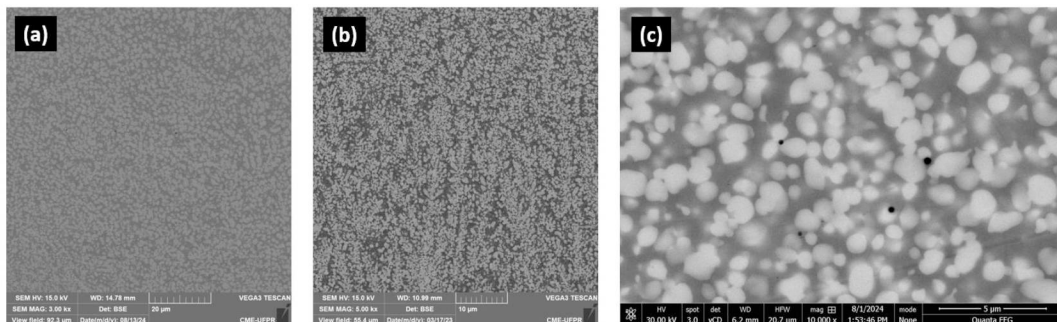


FONTE: O Autor (2024).

4.1.2 Microestrutura

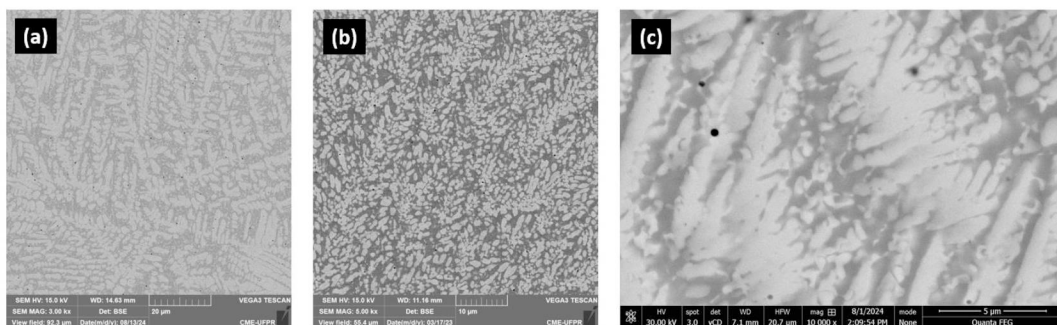
As FIGURAS 23, 24, 25 apresentam as microestruturas obtidas na deposição do material T800® diretamente sobre o substrato de aço AISI 304L. Para de deposição com potência de 2,0 kW, observou-se uma estrutura globular de fase primária de Laves em uma matriz de solução sólida em Cobalto (Co-SS). Já para 2,5 kW, observam-se dendritas de fase Laves primária em uma matriz de solução sólida em Cobalto. Finalmente, para a condição de deposição com 3,0 kW, foram observadas regiões heterogêneas microestruturalmente, apresentando regiões livres de fase Laves primária e uma estrutura lamelar eutética com lamelas de Laves e Co-SS. A FIGURA 26 mostra as microestruturas obtidas no MEV em imagem monocromática, onde foi possível chegar nos resultados de fração de volume de Laves para cada potência de deposição, sendo elas (a) 53%, (b) 65% e (c) 38%.

FIGURA 23 – MICROESTRUTURA DA LIGA TRIBALOY DEPOSITADA SEM A CAMADA INTERMEDIÁRIA EM 2,0 kW COM AMPLIAÇÕES DE (a) 3.000, (b) 5.000 E (c) 10.000 VEZES.



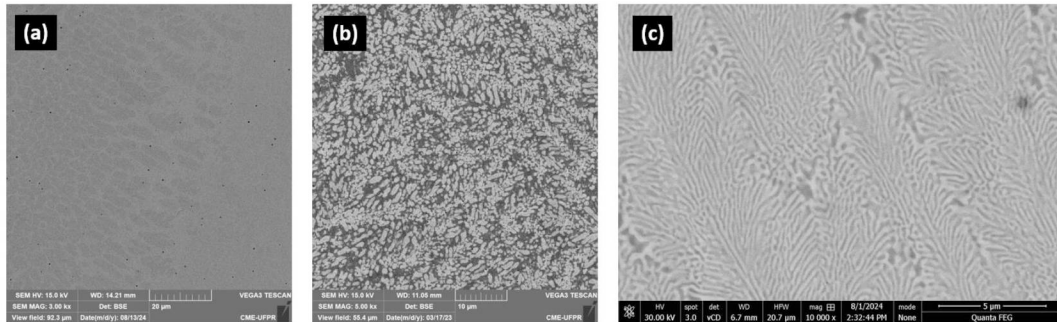
FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 24 – MICROESTRUTURA DA LIGA TRIBALOY DEPOSITADA SEM A CAMADA INTERMEDIÁRIA EM 2,5 kW COM AMPLIAÇÕES DE (a) 3.000, (b) 5.000 E (c) 10.000 VEZES.



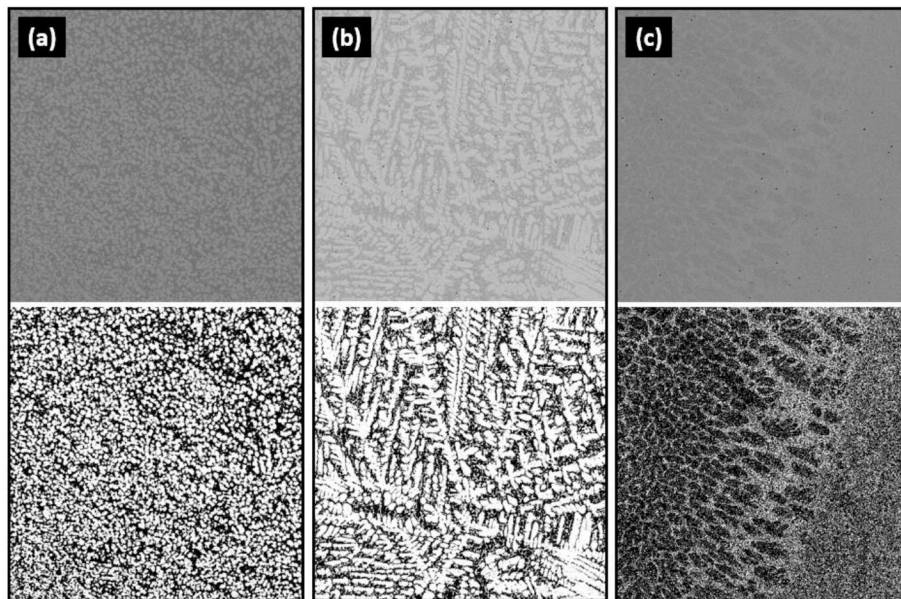
FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 25 – MICROESTRUTURA DA LIGA TRIBALOY DEPOSITADA SEM A CAMADA INTERMEDIÁRIA EM 3,0 kW COM AMPLIAÇÕES DE (a) 3.000, (b) 5.000 E (c) 10.000 VEZES.



FORTE: O Autor (2024).

FIGURA 26 – IMAGEM TRATADA PARA QUANTIFICAÇÃO DE FASES LAVES FORMADA EM POTÊNCIAS DE (a) 2,0 kW, (b) 2,5 kW e (c) 3,0 kW

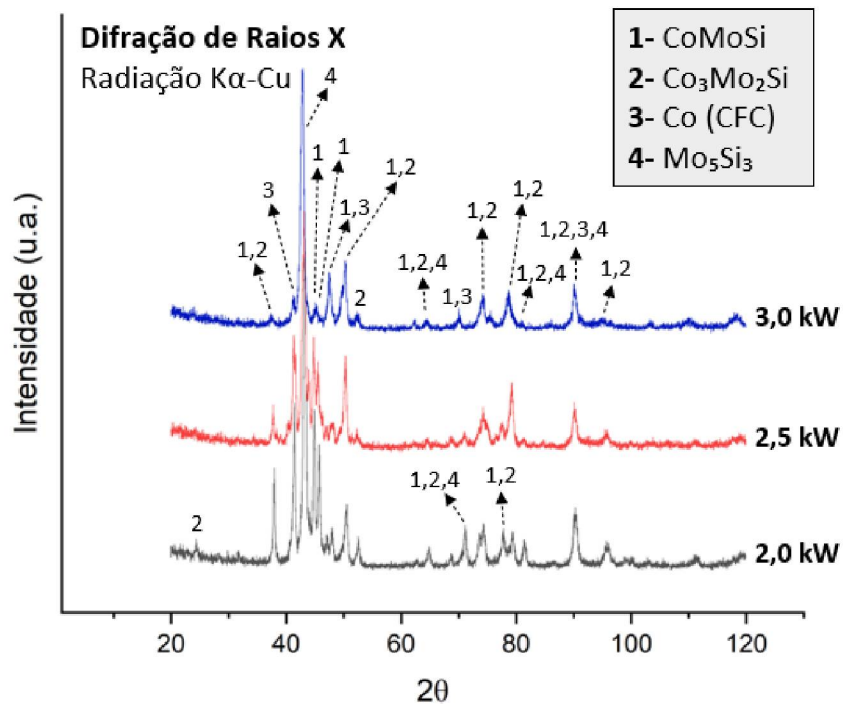


FORTE: O Autor (2024).

4.1.3 Difração de raios X

Foram analisados os padrões de difração de raio X obtidos na camada 02 de liga Tribaloy T800[®], conforme mostra a FIGURA 27. Foram identificados os padrões de difração das fases solução sólida em Cobalto (Co-SS, CFC), fases Laves CoMoSi e Co₃Mo₂Si, bem como intermetálicos Mo₅Si₃.

FIGURA 27 – PADRÕES DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X DA CAMADA DE TRIBALOY DEPOSITADA NAS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER

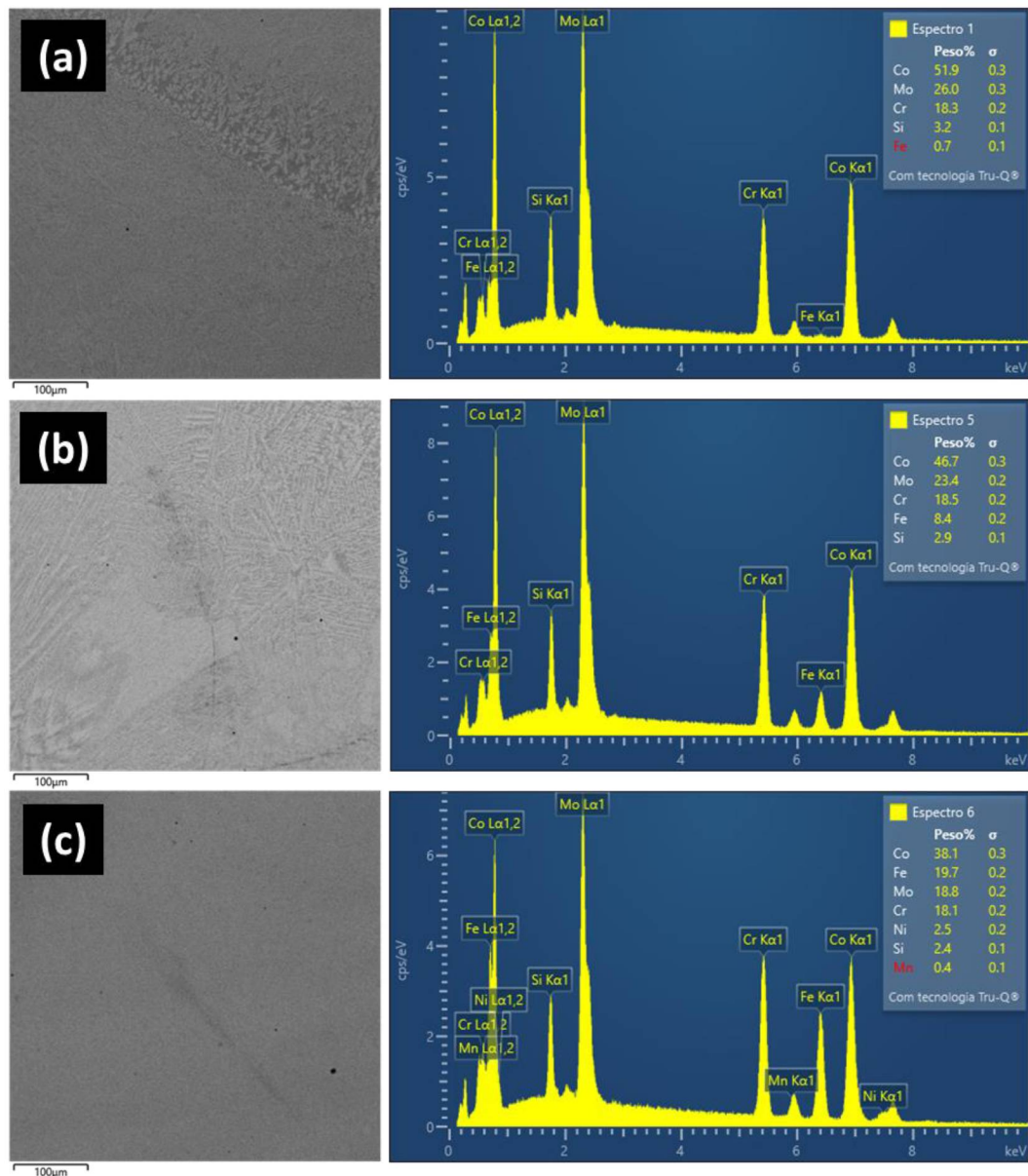


FONTE: O Autor (2024).

4.1.4 Mapa Químico dos Elementos por EDS

A FIGURA 28 apresenta a composição em peso de cada elemento presente na camada de Tribaloy T800[®] depositada de forma direta sobre o substrato AISI 304L, na região da microestrutura mostrada do lado esquerdo da figura. É importante notar a redução gradativa do teor de Co, Mo e Si, que ocorre à medida que uma maior potência de laser é utilizada. As alterações são uma consequência do ingresso de ferro do substrato, que é decorrente da diluição (calculada na próxima seção).

FIGURA 28 – EDS NO REVESTIMENTO DE LIGA TRIBALLOY T800® CONTENDO O MAPA COM PERCENTUAL DOS ELEMENTOS, DEPOSITADO EM (a) 2,0 kW, (b) 2,5 kW e (c) 3,0 kW



FONTE: O Autor (2024).

4.1.5 Diluição

A diluição da camada da liga Triballoy T800® foi calculada em relação ao substrato AISI 304L. Para o cálculo, considerou-se o teor de ferro, sendo esse o elemento mais presente no substrato. A TABELA 4 apresenta os valores da diluição da liga depositada, onde observou-se valores de até 28,5% de diluição para a potência de 3,0 kW. Ao estudar o efeito da potência do laser na diluição de uma superliga sobre um substrato de aço inox, tanto Rivero et al. (2020) como Silva (2019) encontraram

resultados similares ao desse estudo, também utilizando o método de Toyserkani para os cálculos.

TABELA 4 – DILUIÇÃO DA LIGA T800® DEPOSITADA SOBRE AISI 304L

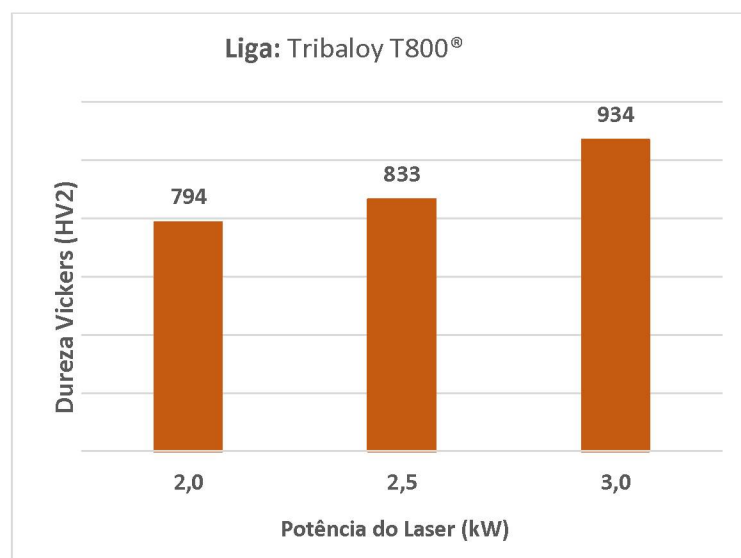
Potência (kW)	ρ_c (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	$X_{substrate}$ Fe (wt%)	$X_{coating}$ Fe (wt%)	$X_{(coating + substrate)}$ Fe (wt%)	Diluição η (%)
2,0	8,6	8,0	71,7	0,4	0,7	0,5
2,5	8,6	8,0	71,7	0,4	8,4	12,0
3,0	8,6	8,0	71,7	0,4	19,7	28,5

FONTE: O Autor, (2024).

4.1.6 Dureza

A fim de entender o comportamento do material depositado na forma de multicamadas, os revestimentos depositados sem camada intermediária foram caracterizados quanto à dureza Vickers com 2 kgf de carga (HV2), conforme mostra a FIGURA 29. A dureza dos revestimentos variou entre 794 e 934 HV2 seguindo os valores reportados anteriormente (Tobar et al., 2008).

FIGURA 29 – GRÁFICO DE DUREZA DA CAMADA TRIBALOY DEPOSITADA SEM A CAMADA INTERMEDIÁRIA

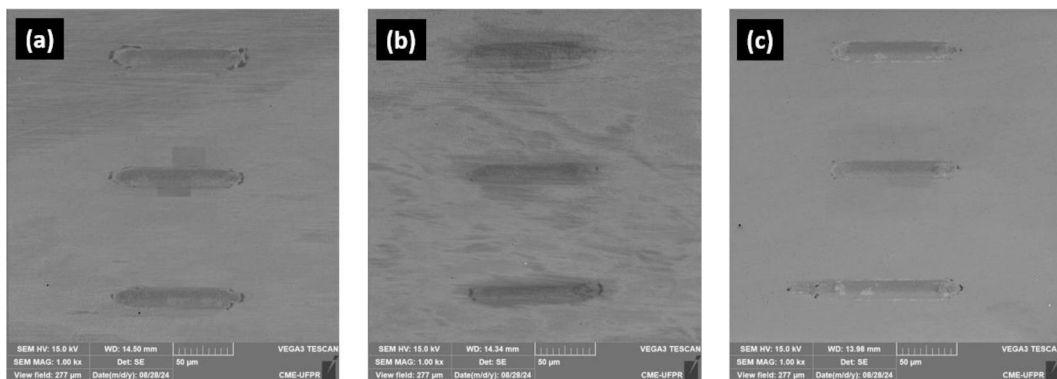


FONTE: O Autor, (2024).

4.1.7 Ensaio de Risco

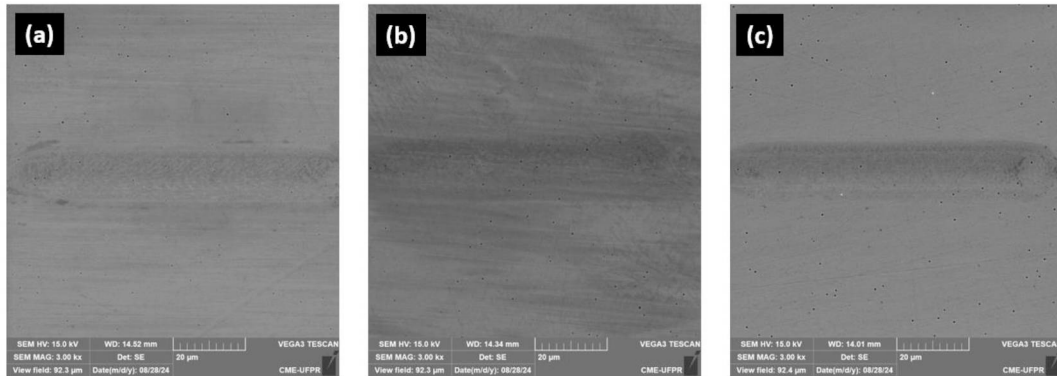
A FIGURA 30 mostra os riscos realizados nas amostras dos cordões depositados em multicamadas sem a camada intermediária em uma menor ampliação, enquanto a FIGURA 31 apresenta os riscos em maior ampliação. As FIGURAS 32 e 33 mostram as microestruturas nas regiões onde foram realizados os riscos. Finalmente, a FIGURA 34 mostra a relação da resistência ao risco com a dureza de cada material depositado, onde o indentador que mais aprofundou na amostra foi no material depositado em 2,0 kW (0,73 μm de profundidade para uma dureza de 794 HV) e onde menos aprofundou foi no material depositado em 3,0 kW (0,61 μm de profundidade para uma dureza de 934 HV). É importante notar que a amostra com mais elevada dureza foi aquela que apresentou uma microestrutura lamelar eutética, provavelmente com uma distribuição mais refinada e uniforme em relação às outras condições. Isso pode explicar os melhores resultados obtidos para o ensaio de risco, isto é, menor aprofundamento da trilha de riscamento.

FIGURA 30 – MEV NOS RISCOS DOS CORDÕES DEPOSITADOS SEM A CAMADA INTERMEDIÁRIA EM (a) 2,0, (b) 2,5 E (c) 3,0 kW



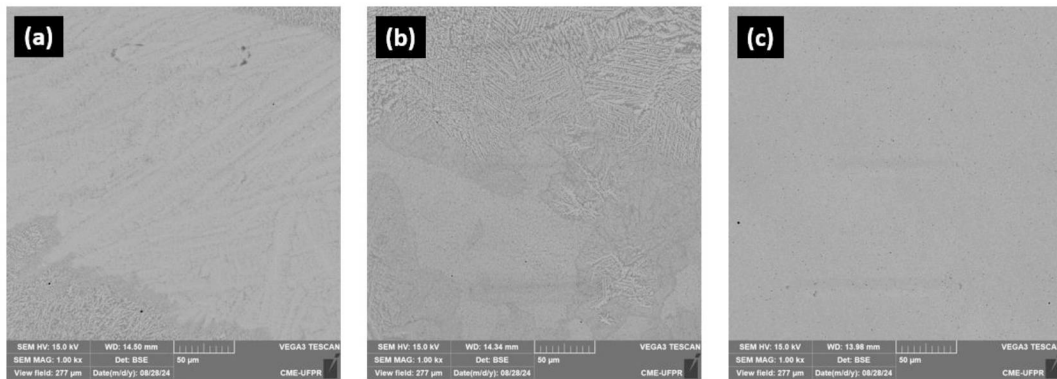
FONTE: O Autor, (2024).

FIGURA 31 – MEV NOS RISCOS DO MEIO AMPLIADOS EM 3.000 VEZES DEPOSITADOS SEM A CAMADA INTERMEDIÁRIA EM (a) 2,0, (b) 2,5 E (c) 3,0 kW



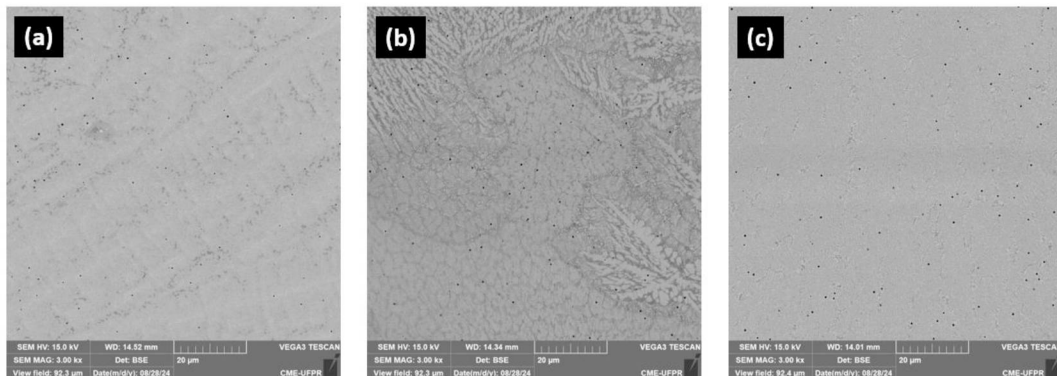
FONTE: O Autor, (2024).

FIGURA 32 – IMAGEM BSE NA REGIÃO DOS RISCOS (SEM A CAMADA INTERMEDIÁRIA) COM AMPLIAÇÃO DE 1.000 VEZES EM (a) 2,0, (b) 2,5 E (c) 3,0 kW



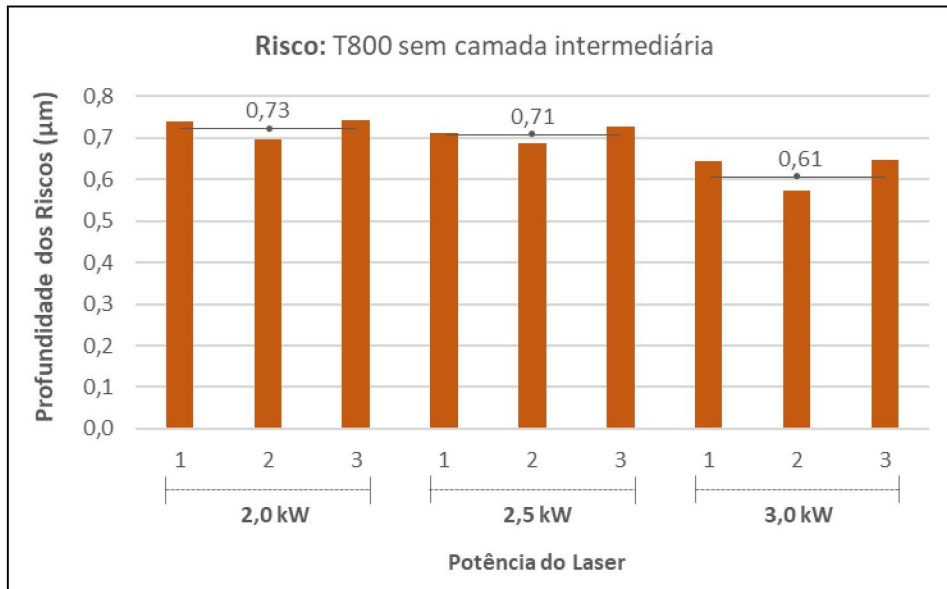
FONTE: O Autor, (2024).

FIGURA 33 – IMEGAM BSE NA REGIÃO DOS RISCOS (SEM A CAMADA INTERMEDIÁRIA) COM AMPLIAÇÃO DE 3.000 VEZES EM (a) 2,0, (b) 2,5 E (c) 3,0 kW



FONTE: O Autor, (2024).

FIGURA 34 – RISCOS PARA CADA POTÊNCIA DA LIGA T800[®] DEPOSITADA SEM A CAMADA INTERMEDIÁRIA



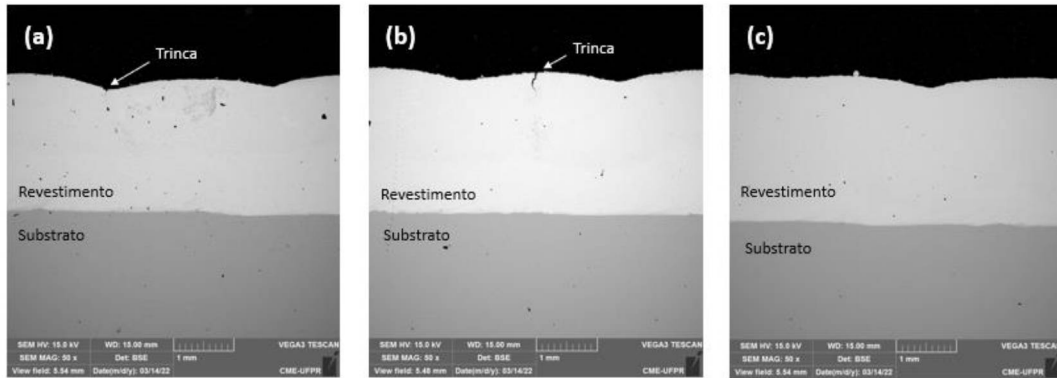
FONTE: O Autor, (2024).

4.2 REVESTIMENTOS COM CAMADA INTERMEDIÁRIA DE LIGA HASTELLOY C276[®]

4.2.1 Macroestrutura

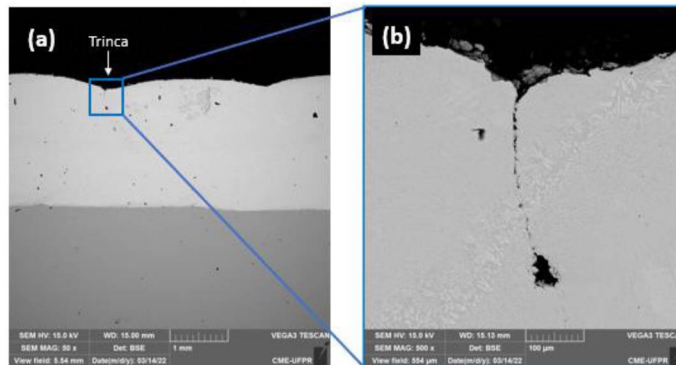
A FIGURA 35 mostra a presença de pequenas trincas, mesmo com a camada secundária da liga de cobalto depositada sobre a camada intermediária de níquel, nas potências de 2,0 kW e 2,5 kW. Sob uma perspectiva maior de ampliação, observou-se mais claramente as trincas na condição depositada com 2,0 kW (FIGURA 36). Contudo, não foi observado esse fenômeno de trincamento na potência de 3,0 kW de deposição, provavelmente em decorrência da maior diluição. A FIGURA 37 mostra uma vista de topo desse material depositado, onde facilmente é possível observar as trincas nos materiais depositados em 2,0 e 2,5, diferentemente do material depositado em 3,0 kW, livre de trincas.

FIGURA 35 – MACROGRAFIA NO CORTE TRANSVERSAL DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADAS EM POTÊNCIAS DE (a) 2,0 kW, (b) 2,5 kW e (c) 3,0 kW



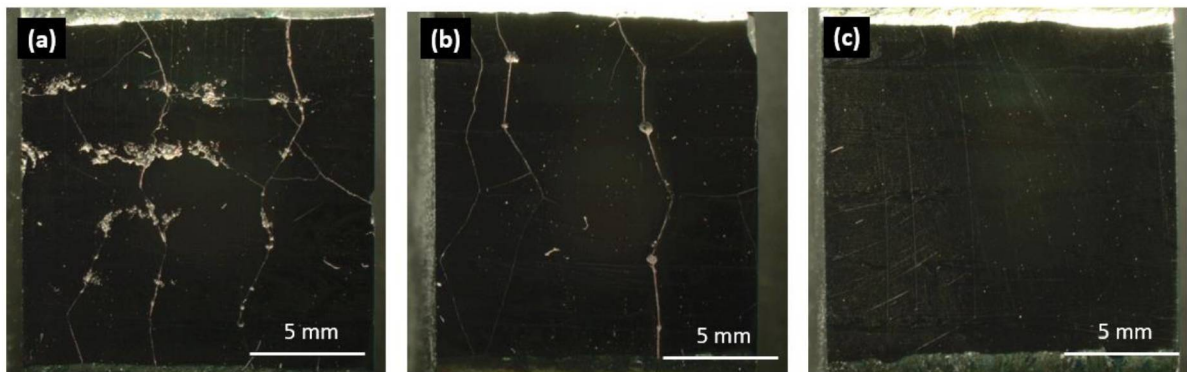
FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 36 – DETALHE DA TRINCA NO MATERIAL DEPOSITADO EM 2,0 kW.



FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 37 – MACROGRAFIA NA VISTA DE TOPO DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS COM POTÊNCIAS DE (a) 2,0 kW, (b) 2,5 kW e (c) 3,0 kW

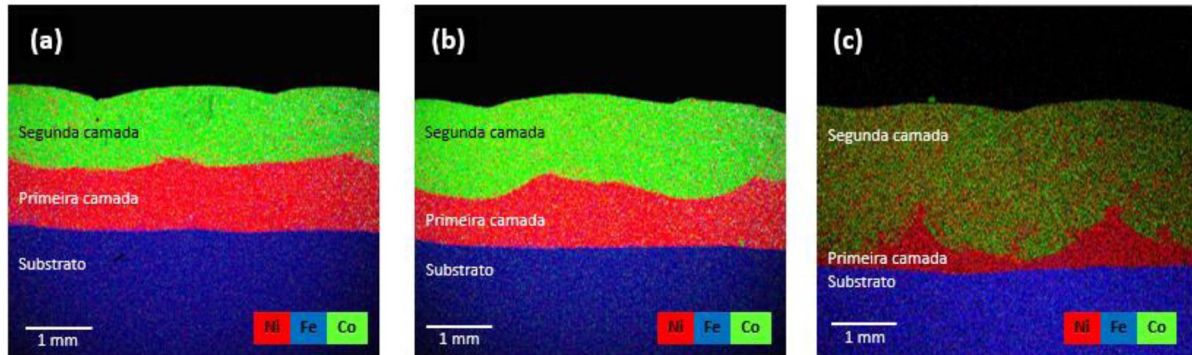


FONTE: O Autor (2024).

As análise química semiquantitativa por EDS revelou claramente o substrato, a primeira camada de liga C276[®] e a segunda camada de liga Tribaloy T800[®] (FIGURA 38). Observou-se, principalmente em (a) e (b), que houve menor diluição entre a segunda e a primeira camadas, revelando uma marcante diferença de

composição. Por outro lado, em (c) observou-se que a maior diluição promove a maior mistura de níquel na camada 02 de liga Tribaloy T800®.

FIGURA 38 – MACROGRAFIA NO MODO *COMPOSITIONAL MAPPING*

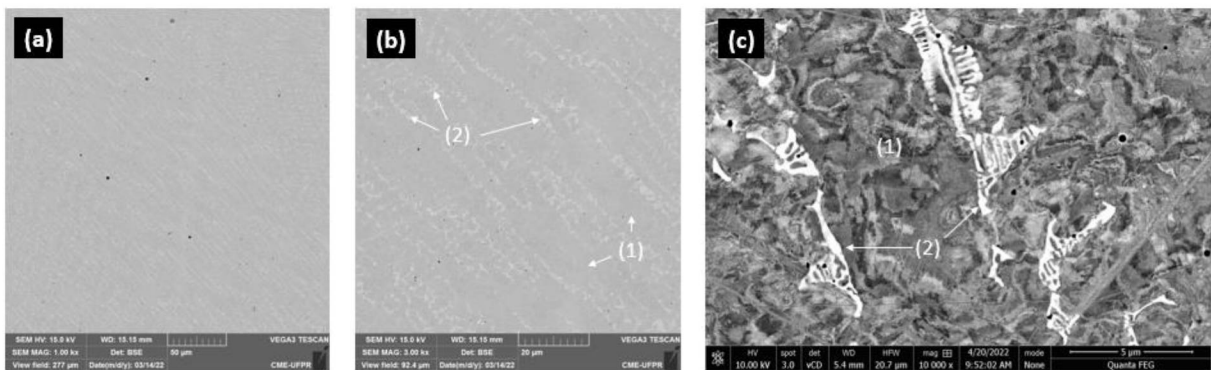


FONTE: O Autor (2024).

4.2.2 Microestrutura

Considerando a potência de 2,0 kW, tivemos a camada intermediária (Hastelloy C276®) composta por dendritas de solução sólida de níquel e carbonetos interdendríticos. A FIGURA 39 mostra a microestrutura de forma geral em uma menor ampliação (a) e (b), podendo-se observar em sua grande maioria as dendritas de solução sólida em Ni-CFC (1), e a presença dos carbonetos interdendríticos (2) e, no detalhe em (c), os carbonetos formados.

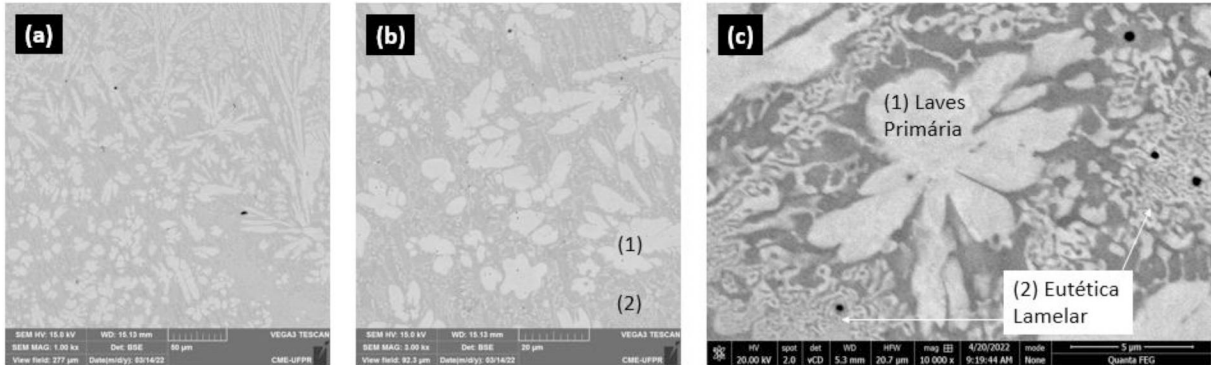
FIGURA 39 – (a) e (b) VISÃO GERAL HASTELLOY C276® (2,0 kW) E (c) DETALHES DA MICROESTRUTURA



FONTE: O Autor (2024).

Ainda para a potência de 2,0 kW, observa-se a microestrutura da segunda camada (Tribaloy T800[®]) composta por dendritas primárias de fase Laves e uma estrutura eutética lamelar composta por lamelas de solução sólida em Co-CFC e fases Laves secundárias (FIGURA 40).

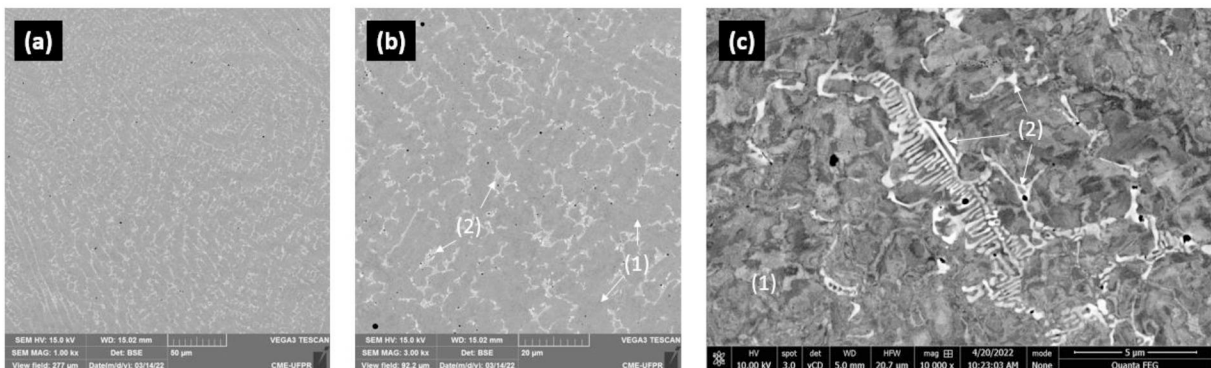
FIGURA 40 – (a) e (b) VISÃO GERAL TRIBALOY T800[®] (2,0 kW) E (c) DETALHES DA MICROESTRUTURA



FONTE: O Autor (2024).

Considerando a potência de 2,5 kW e, da forma similar, é possível identificar dendritas de solução sólida em Ni-CFC contendo carbonetos interdendríticos na camada intermediária (Hastelloy C276[®]), conforme mostra a FIGURA 41.

FIGURA 41 – (a) VISÃO GERAL HASTELLOY C276[®] (2,5 kW) E (b) DETALHES DA MICROESTRUTURA

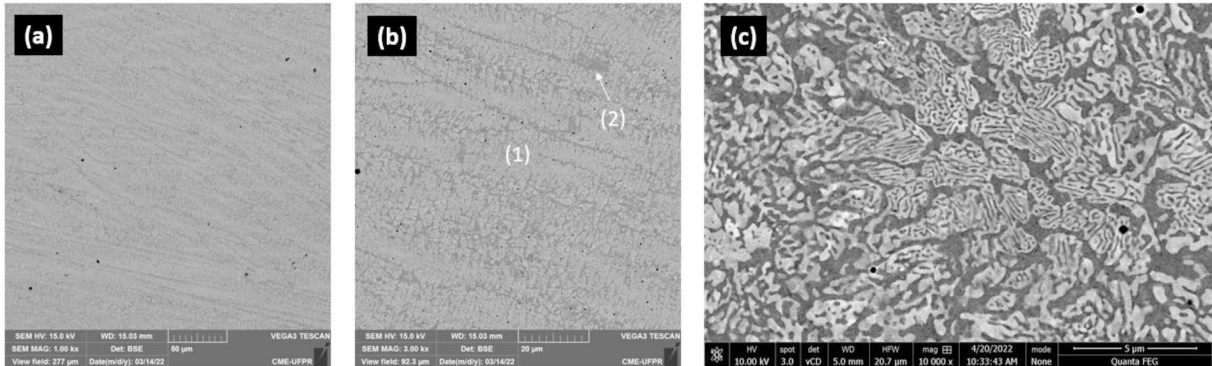


FONTE: O Autor (2024).

A segunda camada (liga T800[®]) depositada na potência de 2,5 kW apresentou uma estrutura lamelar eutética (FIGURA 42), contendo lamelas de solução sólida em Co-CFC e fases Laves secundária (1), também sendo possível observar regiões

intercelulares de solução sólida em Co-CFC (2). É possível observar detalhes dessa estrutura lamelar e das regiões intercelulares na parte c da FIGURA 42.

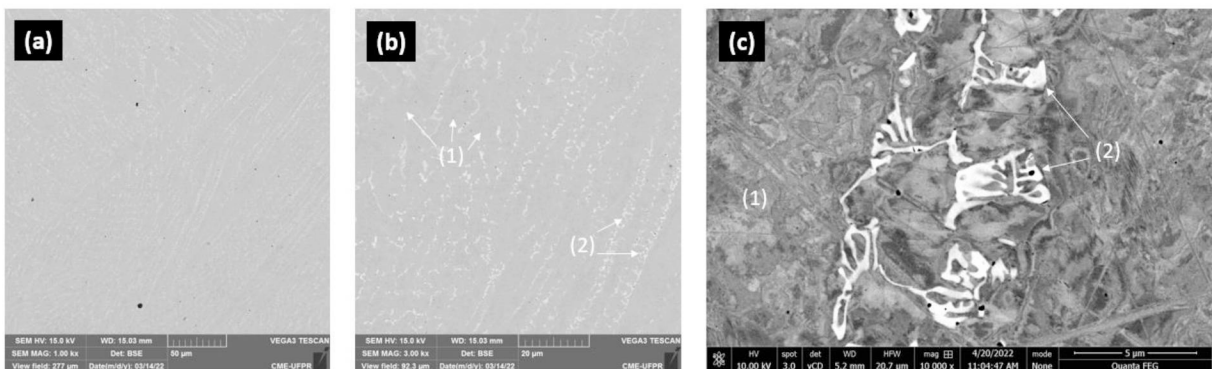
FIGURA 42 – (a) e (b) VISÃO GERAL TRIBALOY T800® (2,5 kW) E (c) DETALHES DA MICROESTRUTURA



FONTE: O Autor (2024).

Por último, nas deposições com potência de 3,0 kW, observa-se uma camada intermediária (Hastelloy C276®) a mesma forma de dendritas de solução sólida em Ni-CFC (1) contendo carbonetos interdendríticos (2) conforme visto na FIGURA 43. É possível observar mais detalhes na FIGURA 43c.

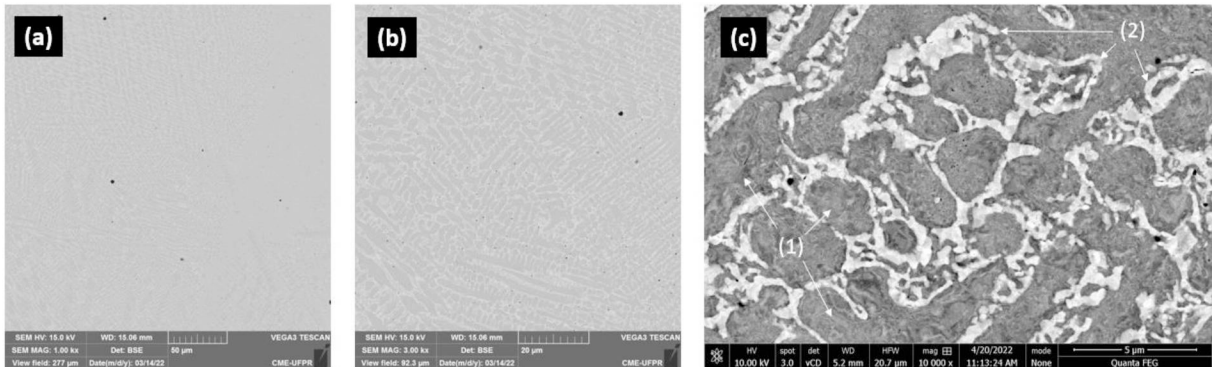
FIGURA 43 – (a) e (b) VISÃO GERAL HASTELLOY C276® (3,0 kW) E (c) DETALHES DA MICROESTRUTURA



FONTE: O Autor (2024).

Também para a segunda camada (Tribaloy T800®) depositada na potência de 3,0 kW observou-se dendritas de solução sólida em Co-CFC (1) e estrutura interdendrítica não lamelar contendo fases Laves secundária (2) (FIGURA 44). É possível observar os detalhes dessa estrutura lamelar e das regiões intercelulares no detalhe (c).

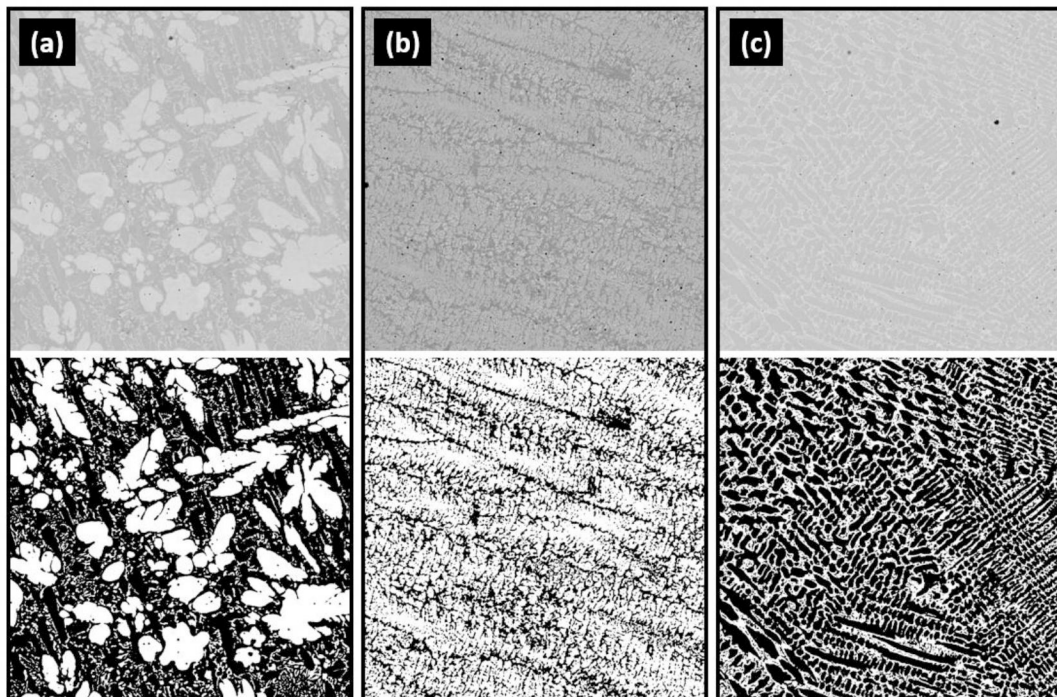
FIGURA 44 – (a) e (b) VISÃO GERAL TRIBALLOY T800® (3,0 kW) E (c) DETALHES DA MICROESTRUTURA



FONTE: O Autor (2024).

A FIGURA 45 traz as imagens tratadas nas quais foram realizados os cálculos e foi possível chegar nos resultados de fração de volume de Laves para cada potência de deposição, sendo elas (a) 47%, (b) 67% e (c) 32%.

FIGURA 45 – IMAGEM TRATADA PARA QUANTIFICAÇÃO DAS FASES LAVES FORMADAS NAS POTÊNCIAS DE (a) 2,0 kW, (b) 2,5 kW e (c) 3,0 kW.

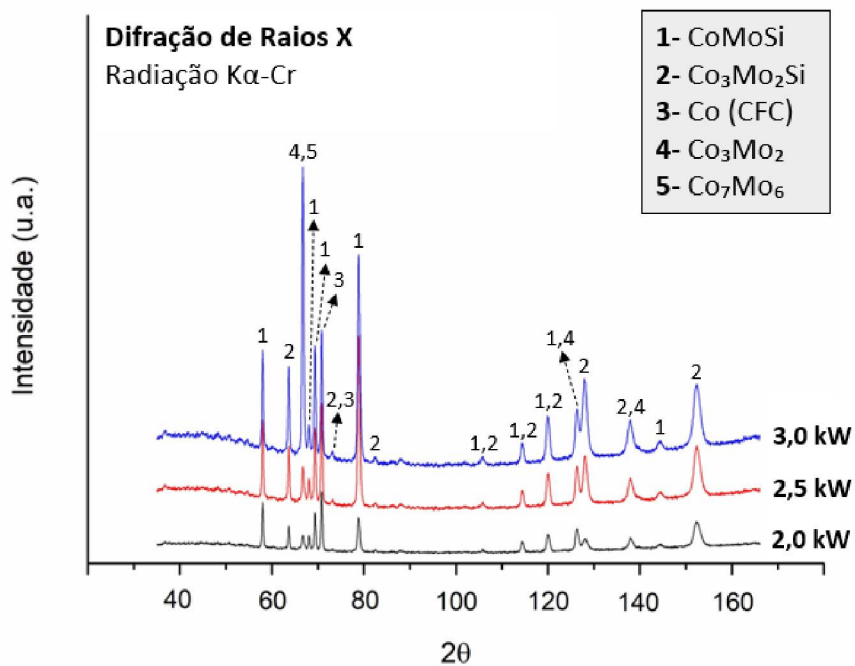


FONTE: O Autor (2024).

4.2.3 Difração de Raios X na Camada O2 (Tribaloy T800®)

Foram feitas análises de difração de raio X na segunda camada aplicada, rica em cobalto (Tribaloy T800®). Para isso, levou-se em conta as três potências utilizadas de 2,0, 2,5 e 3,0 kW. Os padrões de difração de raios- X indicaram a formação de solução sólida em Co-CFC, fases Laves CoMoSi, $\text{Co}_3\text{Mo}_2\text{Si}$, assim como intermetálicos Co_3Mo_2 e Co_7Mo_6 (FIGURA 46), confirmando os resultados anteriores Scheid (2007).

FIGURA 46 – PADRÕES DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X DA CAMADA DE TRIBALOY DEPOSITADA SOBRE A CAMADA INTERMEDIÁRIA NAS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER



FONTE: O Autor (2024).

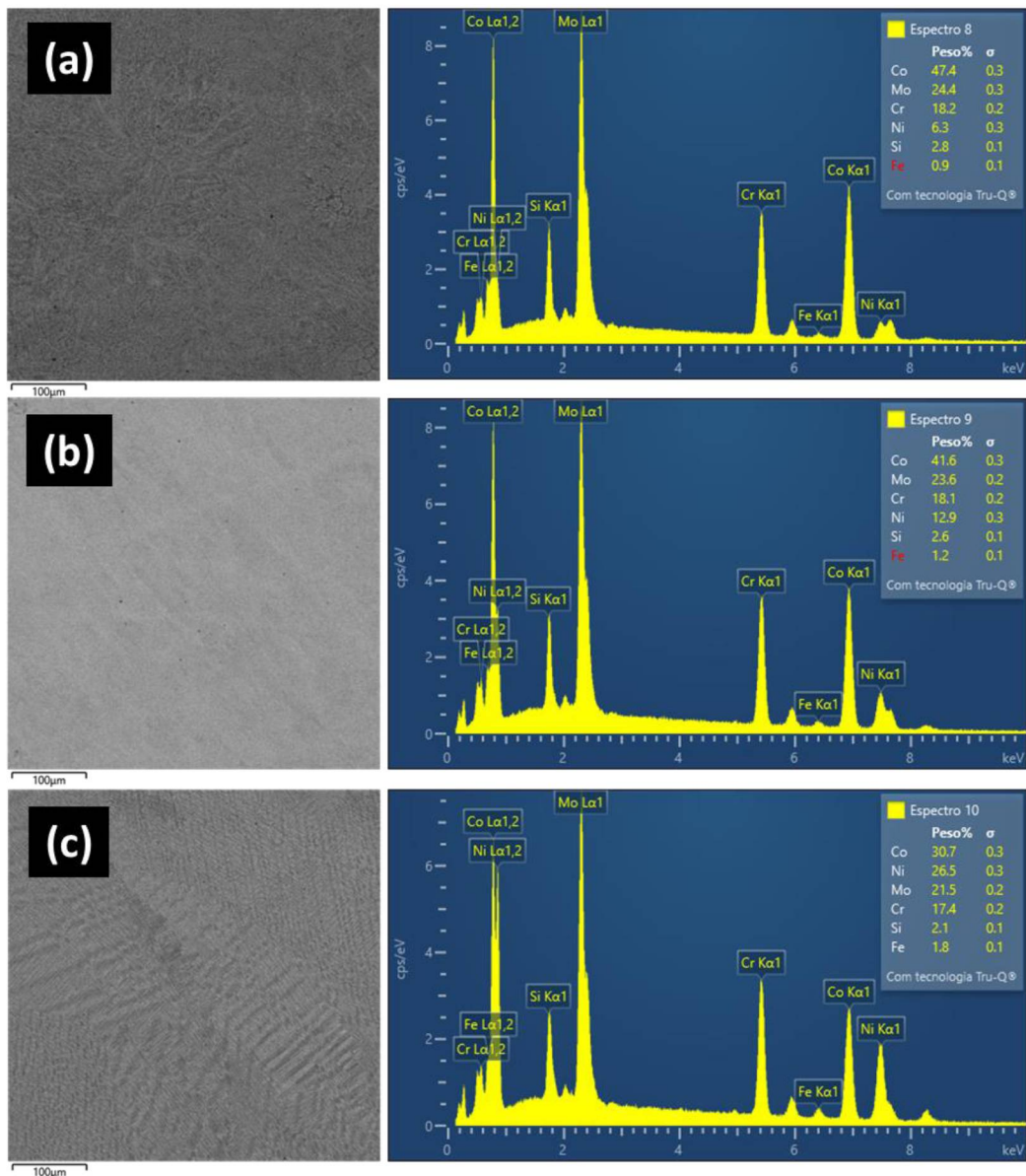
Bohatch, Graf e Scheid (2015) e Bohatch et al. (2015) avaliaram o efeito da diluição sobre a microestrutura dos revestimentos de liga Tribaloy T400® depositados por Plasma com Arco Transferido (PTA) sobre aço inoxidável e reportaram que, à medida que a diluição aumenta, a microestrutura se altera de forma pronunciada. Para baixa diluição, forma-se uma estrutura contendo fase Laves primária e matriz eutética lamelar. O aumento da diluição pode promover a supressão de fase Laves primária, ou mesmo levar à formação de uma microestrutura hipoeutética com dendritas de solução sólida em cobalto e fases Laves interdendrítica. No presente estudo, a

elevação da diluição para a liga T800[®] promove alterações microestruturais similares, indicando uma redução gradual na fração de fase Laves e alteração no modo de solidificação.

4.2.4 Mapa Químico dos Elementos da Liga por EDS na Camada 02

A FIGURA 47 apresenta a composição em peso de cada elemento presente na camada de Tribaloy T800[®] depositada sobre a Hastelloy C276[®], sobre o substrato AISI 304L, na região da microestrutura mostrada do lado esquerdo da figura.

FIGURA 47 – EDS DO REVESTIMENTO TRIBALLOY CONTENDO O MAPA COM PERCENTUAL DOS ELEMENTOS, DEPOSITADO EM DUPLA CAMADA EM (a) 2,0 kW, (b) 2,5 kW e (c) 3,0 kW



FONTE: O Autor, (2024).

4.2.5 Diluição para a Camada 02

Tendo em vista que a camada de interesse em operação real é a camada 02, a diluição desta camada de liga Tribaloy T800® foi calculada em relação à camada 01. Para o cálculo, considerou-se o teor de Níquel, já que a camada 01 passou ao ser o substrato na deposição da camada 02. A TABELA 5 apresenta os valores da diluição da camada 02.

TABELA 5 – DILUIÇÃO DA CAMADA 02 EM RELAÇÃO À CAMADA INTERMEDIÁRIA C276®

Potência (kW)	ρ_c (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	$X_{substrate}$ Ni (wt%)	$X_{coating}$ Ni (wt%)	$X_{(coating + substrate)}$ Ni (wt%)	Diluição η (%)
2,0	8,6	8,9	57,0	0,5	5,2	8,1
2,5	8,6	8,9	56,0	0,5	7,6	12,4
3,0	8,6	8,9	54,0	0,5	21,0	37,5

FONTE: O Autor, (2024).

Observou-se uma diluição para a camada 02 entre 8 e 12%, a partir de uma relação não-linear entre a potência de laser e o valor de diluição para as deposições utilizando as potências de 2,0 e 2,5 kW. Já para a potência de 3,0 kW é observado uma diluição relativamente maior, sendo essa de 37%. Trabalhos anteriores apontam resultados similares para a mesma faixa de potência utilizada na deposição (Rivero et al., 2020; Silva, 2019).

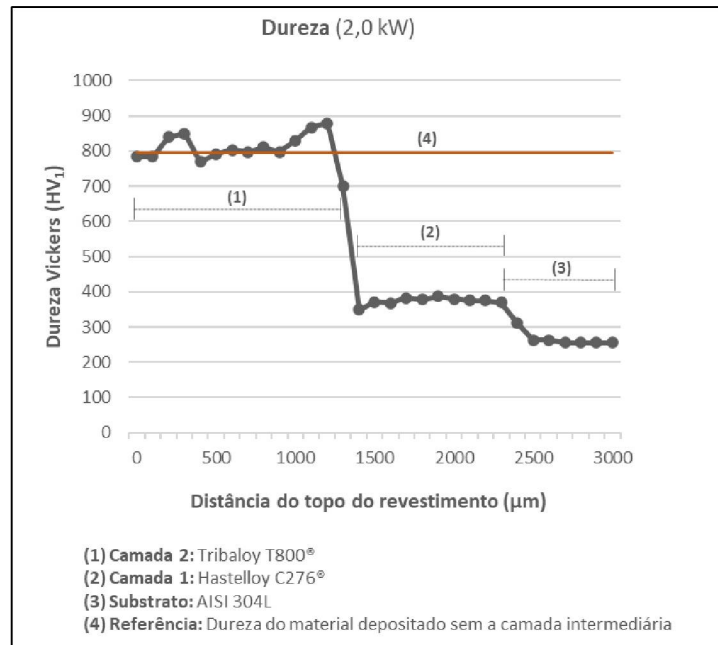
4.2.6 Dureza da Camada 02

As FIGURAS 48, 49 e 50 apresentam os perfis de dureza *Vickers* (HV1), partindo do topo dos revestimentos depositados, até o substrato de aço AISI 304L. Nota-se claramente que os revestimentos de Tribaloy T800® (segunda camada), apresentam dureza superior à primeira camada e ao substrato.

A critério de comparação, foi deixada uma linha da dureza obtida no material Tribaloy T800® depositado de forma direta sobre AISI 340L, ou sem a camada intermediária. Para as deposições em 2,0 e 2,5 kW, é possível observar uma proximidade nesses resultados tanto entre um e outro, como nas deposições realizadas nessas potências de forma direta. Porém, na deposição em 3,0 kW, nota-

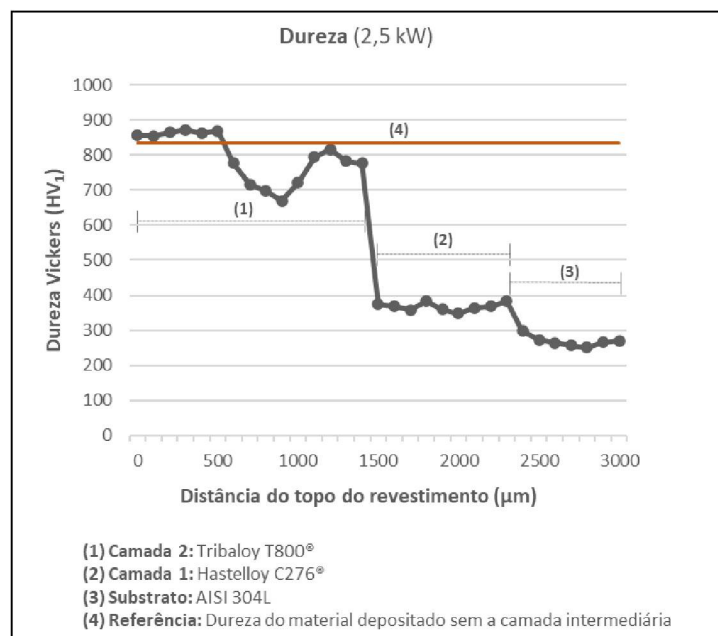
se uma redução significativa das durezas, tanto em comparação com as demais potências de deposição, quanto na deposição do material de forma direta, em decorrência da maior diluição alcançada.

FIGURA 48 – PERFIL DE DUREZA VICKERS DA AMOSTRA DEPOSITADA EM 2,0 kW COM CAMADA INTERMEDIÁRIA



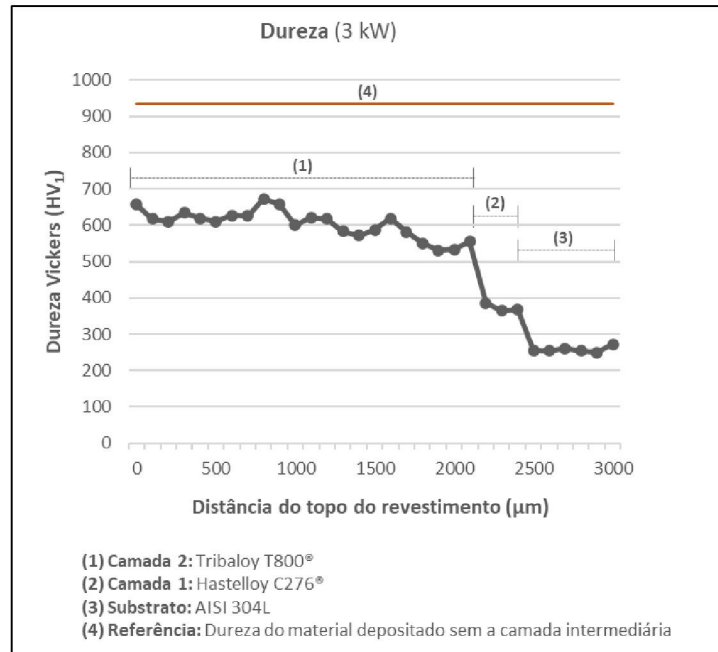
FONTE: O Autor, (2024).

FIGURA 49 – PERFIL DE DUREZA VICKERS DA AMOSTRA DEPOSITADA EM 2,5 kW COM CAMADA INTERMEDIÁRIA



FONTE: O Autor, (2024).

FIGURA 50 – PERFIL DE DUREZA VICKERS DA AMOSTRA DEPOSITADA EM 3,0 kW COM CAMADA INTERMEDIÁRIA



FONTE: O Autor, (2024).

Segundo Scheid (2007), Bohatch et al. (2015), Bohatch, Graf e Scheid (2015), é possível observar que a dureza final obtida para os revestimentos de liga Tribaloy T800® depositados a laser é bastante superior à dureza obtida nos revestimentos depositados por PTA. É razoável sugerir que os revestimentos a laser apresentam um maior refinamento microestrutural, o que contribui para a dureza superior, desde que sejam comparados em níveis de diluição semelhantes. Por outro lado, a segunda camada depositada a laser com potência de 3,0 kW (diluição de 37,5%) apresentou uma dureza de aproximadamente ~600 HV. Este valor é notavelmente superior aqueles observados para esta família de liga, quando depositada com elevada diluição sobre aço inoxidável por PTA. Este aspecto realça o efeito do refinamento da microestrutura e aponta para um efeito benéfico do processamento sobre uma camada intermediária de liga Hastelloy C276®. Neste caso, é bastante plausível apontar para a contribuição da composição química da liga Hastelloy C276® - especialmente Molibdênio, Cromo e Níquel – sobre a dureza final obtida.

Tobar et al. (2008) obteve resultados de dureza similares aos desse estudo, ao depositar a liga Tribaloy T900® sobre o mesmo substrato de aço inoxidável desse estudo. Com cerca de 16% de níquel, a T900 apresenta menor teor de cobalto e Molibdênio quando comparada com a T800®. No presente caso, a composição da liga T800® depositada com 3,0 kW sobre C276® apresenta composição similar à T900®.

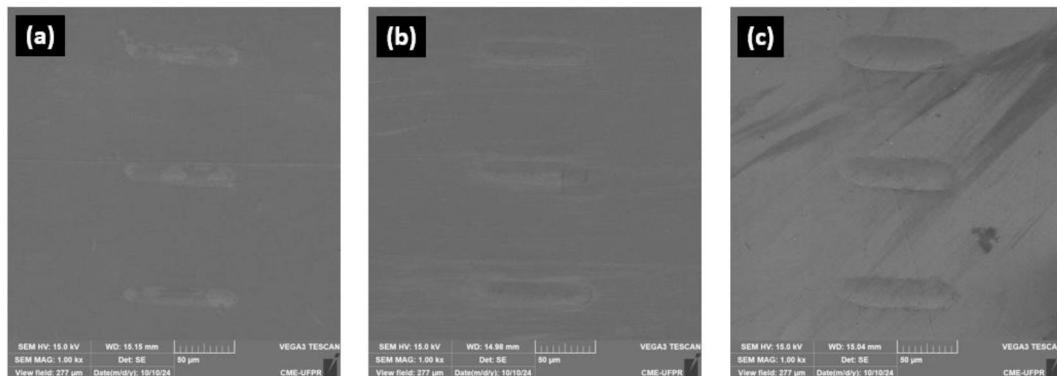
Uma das possíveis causas para a queda da dureza foi a redução na fração de fase Laves na microestrutura.

4.2.7 Resistência ao risco da Camada 02

As FIGURAS 51 e 52 apresentam os aspectos dos riscos realizados nas amostras da liga Tribaloy depositadas sobre a camada intermediária da liga Hastelloy C276®. É possível observar a relação das trilhas obtidas com a dureza de cada uma das amostras. Claramente, uma maior resistência ao risco foi obtida para microestruturas obtidas com potências de 2,0 e 2,5 kW e maiores frações de fases de Laves (FIGURAS 53 e 54).

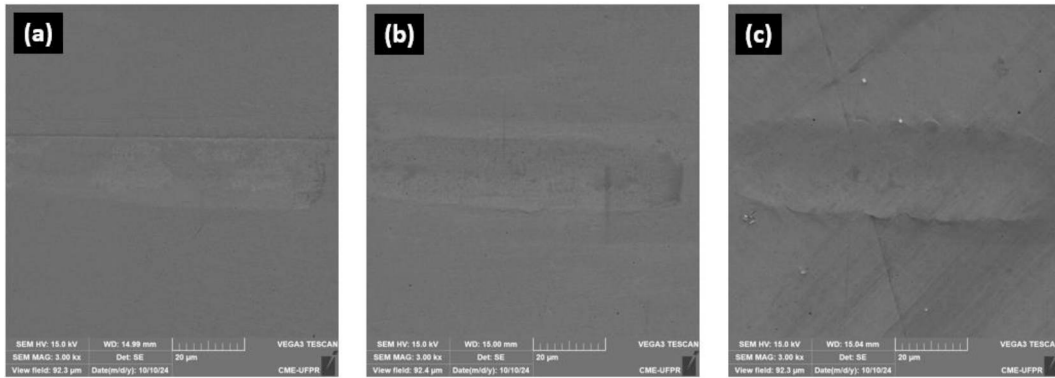
Para a deposição com potências de 2,0 e 2,5 kW obteve-se uma profundidade de riscamento de 0,67 e 0,75 μm em média (durezas médias respectivas de 810 e 800 HV nessa região). Já para a deposição de 3,0 kW, onde obtivemos uma maior diluição, observou-se uma profundidade de riscamento de 1,43 μm (dureza média de 600 HV nessa região), conforme mostra a FIGURA 55.

FIGURA 51 – MEV NOS RISCOS DOS CORDÕES DEPOSITADOS COM A CAMADA INTERMEDIÁRIA EM (a) 2,0, (b) 2,5 E (c) 3,0 kW



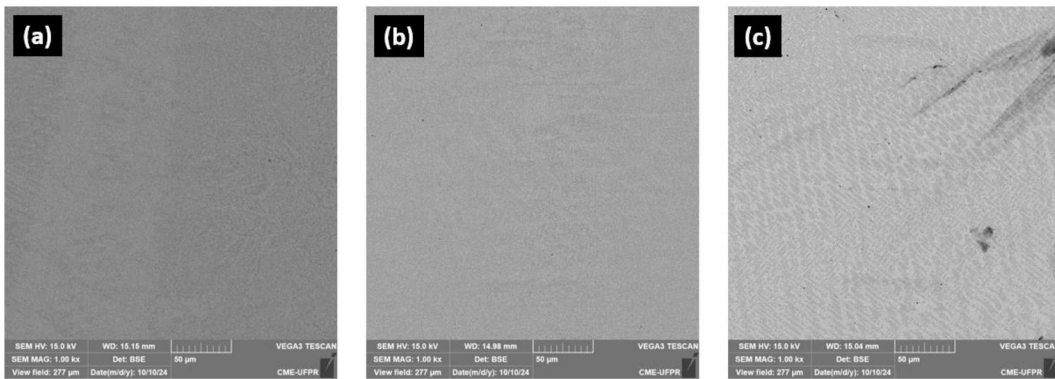
FONTE: O Autor, (2024).

FIGURA 52 – MEV NOS RISCOS DO MEIO AMPLIADOS EM 3.000 VEZES DEPOSITADOS COM A CAMADA INTERMEDIÁRIA EM (a) 2,0, (b) 2,5 E (c) 3,0 kW



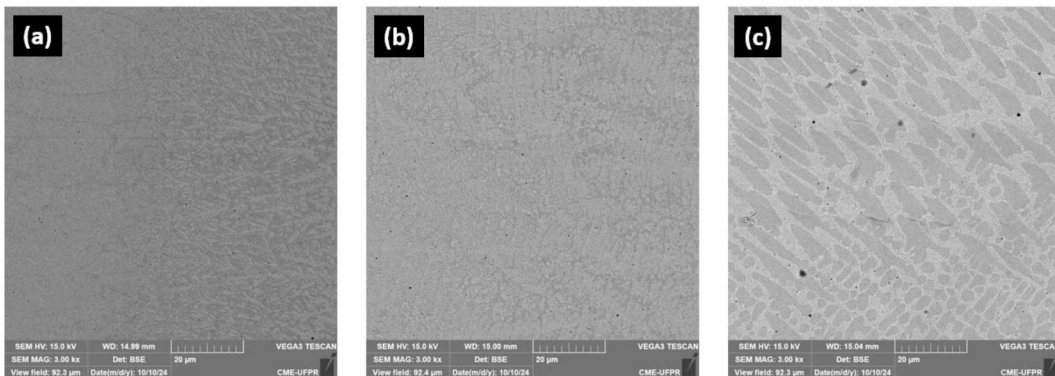
FONTE: O Autor, (2024).

FIGURA 53 – EDS REALIZADO NA REGIÃO DOS RISCOS (COM A CAMADA INTERMEDIÁRIA) COM AMPLIAÇÃO DE 1.000 VEZES EM (a) 2,0, (b) 2,5 E (c) 3,0 kW



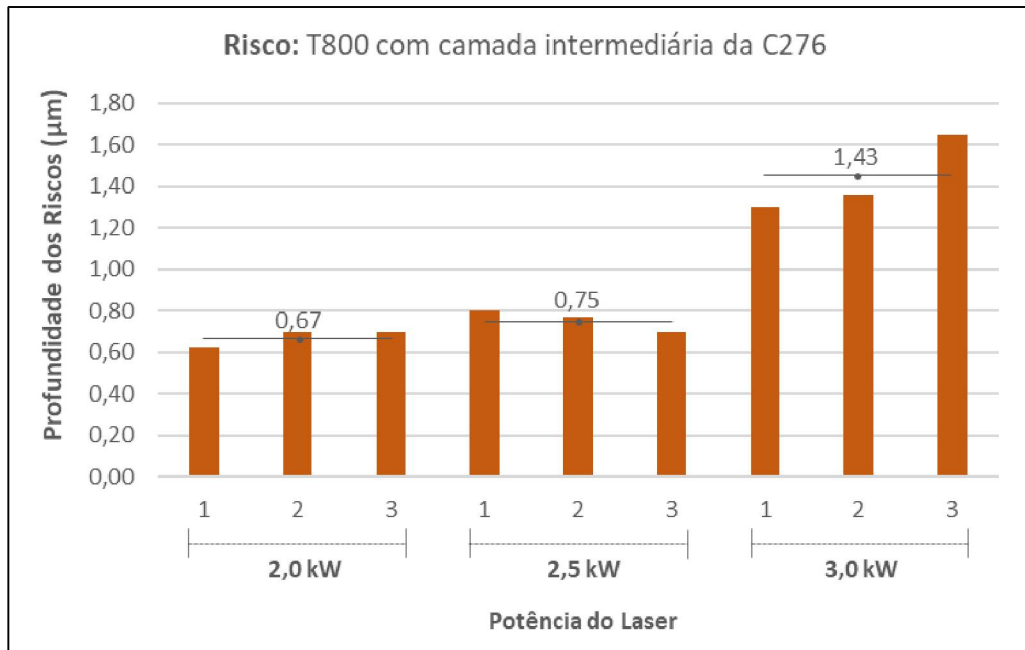
FONTE: O Autor, (2024).

FIGURA 54 – EDS REALIZADO NA REGIÃO DOS RISCOS (COM A CAMADA INTERMEDIÁRIA) COM AMPLIAÇÃO DE 3.000 VEZES EM (a) 2,0, (b) 2,5 E (c) 3,0 kW



FONTE: O Autor, (2024).

FIGURA 55 – PROFUNDIDADE DOS RISCOS PARA CADA POTÊNCIA DA LIGA T800[®] DEPOSITADA SOBRE UMA CAMADA INTERMEDIÁRIA



FONTE: O Autor, (2024).

5 CONCLUSÃO

Esse trabalho analisou a tendência ao trincamento referente à deposição do Tribaloy T800[®] por laser em 3 potências diferentes, comparando a deposição desse material de forma direta ao substrato AISI 304L com a deposição desse material sobre uma camada intermediária de Hastelloy C276[®]. Sobre os resultados das análises macro e microestruturais, fases formadas, diluição, dureza e resistência ao risco, pode-se contribuir conforme os pontos abaixo:

- Observou-se a redução na tendência ao trincamento durante a deposição direta da liga Tribaloy T800[®] para uma maior potência de laser, o que pode estar associado à redução na taxa de resfriamento dos revestimentos, como também, à menor fração de fases Laves formadas. Além disso, observou-se alterações na morfologia das fases Laves, o que pode também ter influenciado positivamente a mitigação da tendência ao trincamento.

- Observou-se que a deposição direta da liga Tribaloy T800[®] com potência de 3,0 kW resultou na formação de uma microestrutura completamente lamelar eutética extremamente refinada. Como consequência, houve elevação na dureza Vickers e uma pequena melhora na resistência ao risco dos revestimentos.

- A deposição da liga Tribaloy T800[®] sobre uma camada intermediária de liga Hastelloy C276[®] resultou na eliminação do trincamento para a potência de 3,0 kW. Isto se deve, provavelmente, ao efeito benéfico do aquecimento decorrente da deposição da camada 01 e também da diluição à primeira camada, que leva à introdução de Níquel, em efeito similar ao proposto para a concepção da liga T900[®].

- Mesmo com a alta diluição da liga T800[®] à liga C276[®] na potência de 3,0 kW, a dureza se manteve consideravelmente alta (~600 HV₂), revelando uma das condições promissoras do presente trabalho. A queda de dureza observada para diluição de cerca de 37% nesta condição revela o efeito benéfico de adotar a camada intermediária de liga Hastelloy C276[®]. Considerando que a camada intermediária é uma liga rica em molibdênio e níquel, o resultado foi uma superfície com alta dureza relativa, baixo teor de ferro e livre de trincas.

REFERÊNCIAS

- BURAKOWSKI, T.; WIERZCHÓN, T. **Surface engineering of metals: principles, equipment, technologies**. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.
- BOHATCH, R. G., GRAF, K., SCHEID, A. **Effect of Track Overlap on the Microstructure and Properties of the CoCrMoSi PTA Coatings**. *Materials Research*, 18: (2015) 553-562. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.340014>.
- BOHATCH, et al. **Influence of Processing on the Microstructure and Properties of CoCrMoSi Alloy PTA Coatings**. *Soldagem & Inspeção*, 20: (2015) 219-227. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2002.09>.
- DEBROY, T.; WEI, H.L.; ZUBACK, J.S.; MUKHERJEE, T.; ELMER, J.W.; MILEWSKI, J.O.; BEESE, A.M.; WILSON-HEID, A.; DE, A.; ZHANG, W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. **Progress in Materials Science**, v. 92, p. 112-224, mar. 2018.
- DOBRZANSKI L.A.; DOBRZANSKA-DANIKIEWICZ A.D. Applications of Laser Processing of Materials in Surface Engineering in the Industry 4.0 Stage of the Industrial Revolution, **Materials Performance and Characterization** 8, no. 6 (2019): 1091–1129. <https://doi.org/10.1520/MPC20190203>.
- FERNANDO, L. et al. A Técnica de Difração de Elétrons RetroEspalhados (EBSD) em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e sua Aplicação no Estudo de Rochas Deformadas. **Revista Pesquisas em Geociências**. [S. l.: s. n.], 2007.
- FERREIRA, L. S.; GRAF, K.; SCHEID, A. Microstructure and Properties of Nickel-based C276 Alloy Coatings by PTA on AISI 316L and API 5L X70 Steel Substrates. **Materials Research**. v. 18, n. 1, p. 212-221, fev. 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.332914>.
- HOLMBERG, K.; ERDEMIR, A. **Influence of tribology on global energy consumption, costs, and emissions**. *Friction*, v. 5, p. 263–284. 2017. <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>
- KOCH, G. et al. Report: International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study. **NACE International**, Houston, Texas, USA, March 2016. <http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf>. Access in: 01/03/2022.
- LEPIENSKI, C.; SOUZA, G.; FOERSTER, C.; KUROMOTO, N.; SOARES, P.; PONTE, H. Nanomechanical and nanotribological properties of bioactive titanium surfaces prepared by alkali treatment. **Journal of the mechanical behavior of biomedical materials**. v. 4, p. 756-765. 2011.
- LEWIS, G. K.; SCHLIENGER, E. Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition. **Materials and Design**, n. 21, p.417-423, 2000.

LI, K.; LI, D.; LIU, D.; PEI, G.; SUN, L. Microstructure evolution and mechanical properties of multiple-layer laser cladding coating of 308L stainless steel, **Applied Surface Science**, v. 340, p. 143-150, 2015.

LIZZUL, L.; SORGATO, M.; BERTOLINI, R.; GHIOTTI, A.; BRUSCHI, S.; FABBRO, F.; RECH, S. On the influence of laser cladding parameters and number of deposited layers on as built and machined AISI H13 tool steel multilayered claddings. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, n. 35, p. 361–370, 2021.

LUO, K.Y.; XU, X.; ZHAO, Z.; ZHAO, S.S.; CHENG, Z.G.; LU, J.Z. Microstructural evolution and characteristics of bonding zone in multilayer laser cladding of Fe-based coating. **Materials Processing Tech.** v. 263, p. 50-58. 2019.

LUZ, A. **Caracterização mecânica e de tribocorrosão de superfícies nanoestruturadas obtidas em superfícies de ligas ti-nb por oxidação anódica.** Tese: (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

MANKINS, W.L.; LAMB, S. Nickel and Nickel Alloys. **ASM Handbook, vol. 02: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.** 10th ed. ASM Metals Park, p. 1362-1424, 1992.

MAZUMDER, J.; DUTTA, D.; KIKUCHI, N.; GHOSH, A. Closed loop direct metal deposition: Art to part. **Optics and Lasers in Engineering**, 34(4–6), p. 397-414, 2000.

NAVAS, C.; CADENAS, M.; CUETOS, J.M.; DAMBORENEA, J. Microstructure and sliding wear behaviour of Tribaloy T-800 coatings deposited by laser cladding, **Wear**, Volume 260, Issues 7–8, Pages 838-846, ISSN 0043-1648, 2006.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.04.020>.

NOWOTNY, S.; SCHAREK, S.; BEYER, E.; RICHTER, K-H. **Laser beam build-up welding: precision in repair, surface cladding, and direct 3D metal deposition.** *J Therm Spray Technol* 16:344–348. doi:10.1007/s11666-007-9028-5, 2007.

OCYLOK, S.; WEISHEIT, A.; KELBASSA, I. Functionally graded multi-layers by laser cladding for increased wear and corrosion protection. **Physics Procedia.** v. 5, p. 359-367. 2010.

RIVERO, L. **Avaliação de revestimentos de superliga Hastelloy® C276 depositados a laser sobre diferentes substratos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Área de Concentração: Manufatura) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

RIVERO, L.; PIZZATO, A.; TEIXEIRA, M.; RABELO, A.; FALCADE, T.; SCHEID, A. Effect of Laser Power, and Substrate on the Hastelloy C276™ Coatings Features Deposited by Laser Cladding. **Materials Research**, April; 23(2): e20200067, p. 1-7, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2020-0067>.

- SCHEID, A. **Estudo da nitretação iônica da liga Ti-6Al-4V**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998.
- SCHEID, A. **Estudo dos mecanismos de degradação para o desenvolvimento de ligas para componentes de pote de galvanização**. Tese (Doutorado em Engenharia – Área de Concentração: Ciência dos Materiais) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.
- SCHWARTZ, A. J. et al. **Electron backscatter diffraction in materials science**. [S. l.]: Springer US, 2009.
- SILVA, C. C. **Avaliação das condições de processamento sobre as características mecânico-metalúrgicas da liga Tribaloy T400 depositada a laser**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Área de Concentração: Manufatura) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2019.
- SOARES, P. A. C. M. **Desenvolvimento do Processo de Laser Cladding com Metais para Fabrico Aditivo**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. Porto, 2014.
- SOUTO, H. I. M. **Laser Cladding: Sua aplicação à deposição de revestimentos em lâminas de destroçadores de madeira**. 2013. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Demm, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013.
- STEIN, F.; LEINEWEBER, A. Laves phases: a review of their functional and structural applications and an improved fundamental understanding of stability and properties. **J Mater Sci**, n. 56, p. 5321–5427, 2021.
- TOBAR, M.J.; AMADO, J.M.; ÁLVAREZ, C.; GARCÍA, A.; VARELA, A.; YÁÑEZ, A. Characteristics of Tribaloy T-800 and T-900 coatings on steel substrates by laser cladding. **Surface & Coatings Technology**, v. 202, p. 2297-2301, 2008.
- TRIBALOY™ T-800 ALLOY. **Deloro Wear Solutions**, 2023. Disponível em: https://www.deloro.com/fileadmin/users/redakteur/006_Downloads/Data_Sheets/Deloro_MDS_Tribaloy800_rev00.pdf. Acesso em 14/05/23.
- TRIBALOY™ T-800. Data on world wide metals and alloys. **Engineering Alloys Digest**. Filing Code: Co-73 Cobalt Alloy. October 1975.
- VUNDRU, C.; PAUL, S.; SINGH, R.; YAN, W. Numerical analysis of multi-layer laser cladding for die repair applications to determine residual stress and hardness. **Procedia Manufacturing**. v 26, p. 952-961. 2018.
- ZHAO, Y.; SUN, J.; LI, J. Study on chip morphology and milling characteristics of laser cladding layer. **Springer Verlag**. v 77, p. 783-796. DOI 10.1007/s00170-014-6483-2. 2015.