

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DAIANA APARECIDA KRUCHELSKI DA SILVA

CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS FUNCIONAIS POR LASER
CLADDING: LIGA TRIBALLOY T800® ADITIVADA COM LIGA HASTELOY C276®

CURITIBA

2024

DAIANA APARECIDA KRUCHELSKI DA SILVA

CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS FUNCIONAIS POR LASER
CLADDING: LIGA TRIBALLOY T800® ADITIVADA COM LIGA HASTELOY C276®

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, Daiana Aparecida Kruchelski da
Caracterização de revestimentos funcionais por laser cladding: Liga
Tribaloy T800® aditivada com Liga Hasteloy C276® / Daiana Aparecida
Kruchelski 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. Resistência de materiais. 2. Revestimentos. 3. Lasers. I. Universidade
Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica. III. Scheid, Adriano. IV . Título.

Bibliotecário: Leticia Priscila Azevedo de Sousa CRB-9/2029

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 **DAIANA APARECIDA KRUCHELSKI DA SILVA** intitulada: **CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS FUNCIONAIS POR LASER CLADDING: LIGA TRIBALLOY T800 ADITIVADA COM LIGA HASTELOY C276**, sob orientação do Prof. Dr. ADRIANO SCHEID, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra 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, 12 de Dezembro de 2024.

Assinatura Eletrônica
15/12/2024 17:32:00.0
ADRIANO SCHEID
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
17/12/2024 15:04:03.0
CARLOS EDUARDO FORTIS KWIETNIEWSKI
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL)

Assinatura Eletrônica
13/12/2024 16:26:36.0
FABIANO OSCAR DROZDA
Avaliador Externo (55001149)

Assinatura Eletrônica
12/12/2024 15:52:28.0
ALEX PIZZATTO
Avaliador Externo (ROBERT BOSCH LTDA)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Jeová Deus pela vida, saúde e pela capacidade de adquirir conhecimentos e desenvolver habilidades por meio do cérebro humano que é tão complexo e incrível.

Agradeço a meu marido Robson Reis da Silva, meu maior incentivador na busca dos meus objetivos, também pela paciência e parceria em todos os momentos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Eng. Adriano Scheid pela oportunidade de desenvolver este trabalho, por acreditar em meu potencial, pela dedicação e por toda orientação e ajuda.

“Todas as coisas que querem que os homens façam a vocês, façam também a eles”. (Mateus 7:12)

RESUMO

Revestimentos depositados a laser têm sido considerados em muitas áreas da engenharia como uma opção atraente para elevar a resistência ao desgaste e à corrosão de componentes industriais. Um estudo recente relatou que quase 23% da energia global é consumida para superar o atrito e para remanufatura de componentes desgastados de máquinas e equipamentos (Holmberg; Erdemir, 2017). Assim, o desenvolvimento de revestimentos para a redução do coeficiente de atrito ou mesmo resistentes ao desgaste e à degradação por processos de corrosão em diversos meios parece se adequar bem às demandas de sustentabilidade, atraindo a atenção da comunidade científica no campo da engenharia de superfícies. Neste contexto, o sistema de liga CoCrMoSi - comercialmente conhecido como Tribaloy® - tem mostrado desempenho promissor no desgaste por contato metal-metal e em processos que envolvem corrosão-desgaste. Além disso, como consequência do refino microestrutural, excelente comportamento em desgaste tem sido também associado aos revestimentos a laser. No entanto, as altas taxas de aquecimento/resfriamento podem levar a micro trincas no revestimento devido aos gradientes térmicos e tensões, dificultando a deposição de muitos sistemas de liga, como a Tribaloy. Este trabalho tem como objetivo investigar a produção de revestimentos funcionais com composição química alterada durante a deposição, ou seja, explorar a mistura *in situ* como forma de ajustar a composição química do revestimento depositado visando mitigar a tendência ao trincamento. Além do efeito da mistura *in situ* realizada a partir de um sistema de duplo alimentador, o efeito do diferente aporte térmico foi também avaliado primeiramente sobre a tendência ao trincamento dos revestimentos de liga CoCrMoSi (Tribaloy T800®). Os revestimentos funcionais de liga Tribaloy T800® receberam 25, 50 e 75% em peso da liga à base de níquel Hastelloy C276®, adotada como liga de aditivação. Após inspeção não destrutiva para avaliar a ocorrência de trincamento, os revestimentos foram caracterizados quanto à diluição, microestrutura, dureza e resistência ao risco. O estudo mostrou que a deposição direta e livre de defeitos da liga Tribaloy T800® se mostrou inviável para os parâmetros de deposição selecionados. Apesar disso, o aumento da potência de Laser parece ter auxiliado a reduzir a taxa de resfriamento o que, juntamente com a diluição, elevou o espaçamento das trincas. Por outro lado, a partir de misturas 50:50 (T800®:C276®) o trincamento foi totalmente eliminado. A adição da liga C276® promove a redução nos teores de Mo e Si e, conseqüentemente, da fração de fase Laves, levando à redução na dureza e na resistência ao risco. Apesar da estratégia de síntese de revestimentos funcionais confirmar a possibilidade de eliminação do trincamento na deposição direta da Tribaloy T800®, torna-se necessário proceder a síntese de revestimentos com menor resistência ao risco e menor dureza.

Palavras-chave: Revestimento a Laser. Revestimentos Funcionais. Hastelloy C276®. Tribaloy T800®. Microestrutura. Dureza. Resistência ao Risco.

ABSTRACT

Laser cladding has been considered in many engineering areas as an attractive option to withstand the wear and corrosion of industrial components. A recent study reported that nearly 23% of global energy is consumed to overwhelm friction and to remanufacture worn components of machines and equipment (Holmberg; Erdemir, 2017). Thus, the development of coatings to obtain lower friction coefficients or even to withstand the wear and corrosion degradation of components seems to fit well with sustainability claims, draining the scientific community's attention in the field of surface engineering. In light of this, the CoCrMoSi alloy system - commercially known as Tribaloy™ – has shown promising performance in metal-to-metal contact wear and under corrosion-wear degradation. Also, due to the extremely refined microstructures, excellent wear behavior has been associated with Laser cladding. However, the high heating/cooling rates often can cause coating microcracks due to the thermal gradients and stresses, hindering the prompt deposition of many alloys, such as Tribaloy. This work aims to investigate the production of compositionally-graded coatings (CGC), which is, to explore the in situ alloy mixing as a way to design the chemical composition of the deposited coating to mitigate the crack tendency. Beyond the effect of in situ mixing from a dual feed system, the effect of distinct heat inputs was primarily evaluated on the cracking tendency of CoCrMoSi (Tribaloy T800™) alloy coatings. Single and multi-bead Tribaloy T800™ compositionally-graded coatings received 25, 50, and 75 wt% of Ni-base Hastelloy C276™ alloy as an additive. After non-destructive inspection to evaluate cracking tendency, coatings were characterized concerning dilution, microstructure, hardness, and scratch resistance. The study showed that the direct and defect-free deposition of the Tribaloy T800™ alloy proved to be unfeasible for the selected deposition parameters. Despite this, the increase in laser power seems to have helped to reduce the cooling rate which, together with the dilution, increased the crack spacing. On the other hand, from 50:50 mixtures (T800™:C276™) cracking was completely eliminated. The addition of the C276™ alloy promotes a reduction in Mo and Si contents and, consequently, the fraction of Laves phase, leading, at the same time, to a reduction in hardness and scratch resistance. Although the strategy for synthesizing functional coatings confirms the possibility of eliminating cracking in the direct deposition of Tribaloy T800™, it seems the price is the need for coatings with lower hardness and scratch resistance.

Keywords: Laser Cladding. Compositionally-Graded Coatings (CGC). Coatings Cracking. Hastelloy C276™. Tribaloy T800™. Microstructure. Hardness. Scratch Resistance.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS TÉCNICAS DE DEPOSIÇÃO A LASER: (a) PROCESSO EM DUAS ETAPAS; (b) PROCESSO EM UMA ETAPA INCLUINDO: (b1) DEPOSIÇÃO DE PASTA; (b2) INJEÇÃO DE PÓ; (b3) ALIMENTAÇÃO DE ARAME	21
FIGURA 2 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE PÓ: (a) COAXIAL; (b) LATERAL	17
FIGURA 3 – MACROGRAFIAS DOS CORDÕES DE LIGA HASTELLOY C276® DEPOSITADOS SOBRE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304L COM POTÊNCIAS ENTRE 1,5 E 4,0 kW	20
FIGURA 4 – DILUIÇÃO TÍPICA CALCULADA PELO MÉTODO DE TOYSERKANI	21
FIGURA 5 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DUPLA PARA FABRICAR A LIGA INCONEL 718 COM VÁRIAS PORCENTAGENS DE TiC.....	23
FIGURA 6 – DESENHO ESQUEMÁTICO DA CONSTRUÇÃO DE CAMADAS GRADUADAS	24
FIGURA 7 – MICROESTRUTURA DO REVESTIMENTO A LASER DA LIGA TRIBALLOY T800® SOBRE UM SUBSTRATO À BASE DE NÍQUEL.	26
FIGURA 8 – FLUXOGRAMA EXPERIMENTAL DA PESQUISA	28
FIGURA 9 – INSTALAÇÕES GERAIS DO EQUIPAMENTO LASER CLADDING FABRICANTE PRECO.....	31
FIGURA 10 – EQUIPAMENTO DE CORTE POR ELETROEROSÃO CHARMILLES ROBOFIL 290P®	32
FIGURA 11 – SECCIONADORA BRILLANT 220®	34
FIGURA 12 – EQUIPAMENTO DE EMBUTIMENTO A QUENTE OPAL 410® - ATM	35
FIGURA 13 – EQUIPAMENTO UTILIZADO NO ENSAIO DE DUREZA VICKERS HMV-G SERIES®	37
FIGURA 14 – INDENTADOR E LENTES DO EQUIPAMENTO HMV-G SERIES® ...	38
FIGURA 15 – EQUIPAMENTO MARCA UNAT ZWICK ROELL®	39
FIGURA 16 – ENSAIO DE NANO RISCO COM INDENTADOR TIPO ESFÉRICO ..	40
FIGURA 17 – ENSAIO DE NANO RISCO COM INDENTADOR TIPO BERKOVICH	40

FIGURA 18 – ANÁLISE MACROGRÁFICA DOS REVESTIMENTOS COM T800® SEM ADITIVAÇÃO PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	43
FIGURA 19 – ENSAIO POR LÍQUIDO PENETRANTE DOS REVESTIMENTOS COM T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	43
FIGURA 20 – MACROGRAFIA DOS REVESTIMENTOS DA LIGA T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	44
FIGURA 21 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA A POTÊNCIA DE LASER 2,0 kW	45
FIGURA 22 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA A POTÊNCIA DE LASER 2,5 kW	45
FIGURA 23 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA A POTÊNCIA DE LASER 3,0 kW	46
FIGURA 24 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA A POTÊNCIA DE LASER 3,0 kW – COM AMPLIAÇÃO NOMINAL DE 20 MIL VEZES	46
FIGURA 25 – ANÁLISES POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	47
FIGURA 26 – DILUIÇÃO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER.....	48
FIGURA 27 – TEOR DE FERRO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER	49
FIGURA 28 – TEOR DE MOLIBDÊNIO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER.....	49
FIGURA 29 – TEOR DE CROMO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER	50

FIGURA 30 – TEOR DE SILÍCIO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER	51
FIGURA 31 – FRAÇÃO DE FASE LAVES DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	52
FIGURA 32 – PERCENTUAL DE FRAÇÃO DE FASE LAVES DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	52
FIGURA 33 – DUREZA DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	53
FIGURA 34 – MEV DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	54
FIGURA 35 – MEV DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	54
FIGURA 36 – PROFUNDIDADE DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	55
FIGURA 37 – IMAGENS DO ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE NAS AMOSTRAS DE LIGA T800® ADITIVADA COM A LIGA C276®	57
FIGURA 38 – MACROGRAFIA DOS REVESTIMENTOS COM 50% DE T800® E 50% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	57
FIGURA 39 – MACROGRAFIA DO REVESTIMENTO COM 75% DE T800® E 25% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE LASER DE 2,0 kW.....	58
FIGURA 40 – MACROGRAFIA DOS REVESTIMENTOS COM 25% DE T800® E 75% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	58
FIGURA 41 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS COM 50% DE T800® E 50% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE LASER 2,0 kW	59

FIGURA 42 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS COM 50% DE T800® E 50% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE LASER 2,5 kW	59
FIGURA 43 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS COM 50% DE T800® E 50% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE LASER 3,0 kW	60
FIGURA 44 – PADRÕES DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X DOS REVESTIMENTOS COM 50% DE T800® E 50% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	61
FIGURA 45 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS COM 75% DE T800® E 25% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE 2,0 kW	61
FIGURA 46 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS COM 75% DE T800® E 25% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE 2,0 kW COM AMPLIAÇÃO NOMINAL DE 20 MIL VEZES	62
FIGURA 47 – PADRÕES DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X DOS REVESTIMENTOS COM 75% DE T800® E 25% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE 2,0 kW	62
FIGURA 48 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS COM 25% DE T800® E 75% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE 2,0 kW	63
FIGURA 49 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS COM 25% DE T800® E 75% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE 2,5 kW	63
FIGURA 50 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS COM 25% DE T800® E 75% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE 3,0 kW	64
FIGURA 51 – PADRÕES DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X DOS REVESTIMENTOS COM 25% DE T800® E 75% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	64
FIGURA 52 – DILUIÇÃO DOS REVESTIMENTOS COM 50% DE T800® E 50% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	65
FIGURA 53 – DILUIÇÃO DOS REVESTIMENTOS COM 25% DE T800® E 75% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	66
FIGURA 54 – TEOR DE FERRO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® ADITIVADA COM A LIGA HASTELLOY C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER	67

FIGURA 55 – TEOR DE NÍQUEL DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® ADITIVADA COM A LIGA HASTELLOY C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER	67
FIGURA 56 – TEOR DE COBALTO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® ADITIVADA COM A LIGA HASTELLOY C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER	68
FIGURA 57 – TEOR DE MOLIBDÊNIO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® ADITIVADA COM A LIGA HASTELLOY C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER.....	69
FIGURA 58 – TEOR DE CROMO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® ADITIVADA COM A LIGA HASTELLOY C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER	69
FIGURA 59 – TEOR DE SILÍCIO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® ADITIVADA COM A LIGA HASTELLOY C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER	70
FIGURA 60 – FRAÇÃO DE FASE LAVES DOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 50% DE T800® E 50% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	71
FIGURA 61 – FRAÇÃO DE FASE LAVES DOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 75% DE T800® E 25% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE 2,0 kW ...	71
FIGURA 62 – FRAÇÃO DE FASE LAVES DOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 25% DE T800® E 75% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	72
FIGURA 63 – PORCENTAGEM DE FRAÇÃO DE FASE LAVES DOS REVESTIMENTOS DA LIGA T800® ADITIVADA COM A LIGA C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS.....	72
FIGURA 64 – DUREZA DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® ADITIVADA COM A LIGA HASTELLOY C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER	73
FIGURA 65 – MEV DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 50% DE T800® E 50% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	74

FIGURA 66 – MEV DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 50% DE T800® E 50% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	74
FIGURA 67 – PROFUNDIDADE DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 50% DE T800® E 50% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	75
FIGURA 68 – MEV DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 75% DE T800® E 25% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE LASER 2,0 kW	75
FIGURA 69 – MEV DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 75% DE T800® E 25% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE LASER 2,0 kW	76
FIGURA 70 – PROFUNDIDADE DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 75% DE T800® E 25% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE LASER 2,0 kW	76
FIGURA 71 – MEV DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 25% DE T800® E 75% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	77
FIGURA 72 – MEV DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 25% DE T800® E 75% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	77
FIGURA 73 – PROFUNDIDADE DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 25% DE T800® E 75% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS	78

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES DA LIGA TRIBALLOY T800®	24
QUADRO 2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES DA LIGA HASTELLOY C276®	27
QUADRO 3 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS LIGAS	29
QUADRO 4 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO SUBSTRATO.....	29
QUADRO 5 – PARÂMETROS CONTROLADOS DE DEPOSIÇÃO DOS REVESTIMENTOS	32

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS	30
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

AISI 304L	- Tipo de aço inox popular amplamente usado na indústria em geral
Bal.	- Determinado elemento de uma composição em balanço com a liga
C	- Carbono
CFC	- Estrutura cúbica de face centrada
Co	- Cobalto
Cr	- Cromo
EDS	- <i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
Fe	- Ferro
GGG40	- Ferro fundido nodular
HC	- Estrutura hexagonal compacta
HRC	- Hardness Rockwell C (unidade de medida de dureza)
MEV	- Microscopia Eletrônica de Varredura
Mn	- Manganês
Mo	- Molibdênio
N	- Nitrogênio
Ni	- Níquel
P	- Fósforo
S	- Enxofre
Si	- Silício
SS	- Solução sólida
TiC	- Carboneto de titânio
V	- Vários
W	- Tungstênio

LISTA DE SÍMBOLOS

®	- Marca registrada
cm ³	- Centímetro cúbico
d_{hkl}	- Distância interplanar
G	- Giga
g	- Grama
K	- Kelvin
kW	- Quilowatt
M	- Mega
m	- metro
nm	- Nanômetro
°C	- Graus Celsius
Pa	- Pascal
W	- Watts
W	- Largura do cordão
wt%	- Percentual em massa
X_c	- Teor de níquel da liga de revestimento
X_{c+s}	- Teor de níquel da liga de revestimento após a deposição
X_s	- Teor de níquel da liga do substrato
μ	- Micro
n	- Número inteiro
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
1.3 METODOLOGIA.....	19
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 ENGENHARIA DE SUPERFÍCIES	20
2.2 DEPOSIÇÃO A LASER – <i>LASER CLADDING</i>	20
2.2.1 Vantagens e Desvantagens do Processo.....	18
2.2.2 Potência do Laser	19
2.3 REVESTIMENTOS FUNCIONAIS.....	21
2.4 LIGA DE REVESTIMENTO TRIBALLOY T800®	24
2.5 LIGA DE REVESTIMENTO HASTELLOY C276®.....	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 FLUXOGRAMA DA PESQUISA	28
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS	28
3.3 PREPARAÇÃO DO SUBSTRATO	29
3.4 PROCESSO DE DEPOSIÇÃO – <i>LASER CLADDING</i>	30
3.5 RETIRADA DAS AMOSTRAS PARA CARACTERIZAÇÃO	32
3.5.1 Eletroerosão a fio	32
3.5.2 Ensaio por Líquido Penetrante	33
3.5.3 Processo de corte em seção transversal.....	33
3.5.4 Embutimento Metalográfico.....	34
3.5.5 Lixamento e Polimento	35
3.6 DILUIÇÃO DOS REVESTIMENTOS	35
3.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	36
3.8 DIFRAÇÃO DE RAIOS X	37
3.9 ENSAIOS MECÂNICOS.....	37
3.9.1 Ensaio de dureza Vickers.....	37
3.9.2 Ensaio de Risco	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42

4.1 DEPOSIÇÃO DIRETA DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA (CONDIÇÃO DE REFERÊNCIA).....	42
4.1.1 Macroestrutura e Líquido Penetrante	42
4.1.2 Microestrutura e Difração de Raios X.....	44
4.1.3 Análise da Diluição	47
4.1.4 Análise Química Semiquantitativa por EDS	48
4.1.5 Fração de Fase Laves.....	51
4.1.6 Dureza e Resistência ao Risco	53
4.2 REVESTIMENTOS DE LIGA TRIBALLOY T800® ADITIVADA COM LIGA HASTELLOY C276® – REVESTIMENTOS FUNCIONAIS	56
4.2.1 Macroestrutura	56
4.2.2 Microestrutura e Difração de Raios X.....	58
4.2.3 Análise da Diluição	65
4.2.4 Análise Química Semiquantitativa por EDS	66
4.2.5 Fração de Fase Laves.....	70
4.2.6 Dureza.....	72
4.2.7 Resultados Ensaio de Risco.....	73
5 CONCLUSÃO	79
REFERÊNCIAS.....	80

1 INTRODUÇÃO

As falhas por desgaste, desgaste-fadiga e corrosão em componentes industriais e produtos despertam a atenção de engenheiros e técnicos há pelo menos quatro décadas e o seu impacto no custo industrial de operação foi um fator decisivo para a criação da engenharia de superfícies como ramo da ciência. Um estudo recente relata que a tribologia representa em torno de 23% do consumo global de energia, sendo 20% relacionados a perdas por atrito e 3% a processos de remanufatura de peças (Holmberg; Erdemir, 2017). Ainda, uma estimativa indica que o custo global associado à corrosão pode alcançar até 2,5 trilhões de dólares (Koch et al., 2016). Além disso, a corrosão pode levar a acidentes ambientais graves e acidentes do trabalho (Wulpi, 1999).

A engenharia de superfícies é reconhecida como ramo da ciência desde os anos 70 e diversas técnicas podem ser adotadas para promover a formação de camadas superficiais, normalmente com melhores propriedades em comparação ao material do núcleo de componentes (Burakowski; Wierzchon, 1999). Um destes grupos de técnicas engloba a deposição de revestimentos, com grande destaque para aquele que utiliza um feixe de laser para fundir um material de adição e depositá-lo sobre um substrato, amplamente conhecido como deposição a laser ou *laser cladding* (Toyserkani; Khajepour; Corbin, 2005).

A deposição a laser permite a obtenção de revestimentos com baixa diluição, assegurando a união metalúrgica revestimento-substrato. Os materiais depositados estão sujeitos a elevadas taxas de resfriamento na solidificação, levando à formação de microestruturas extremamente refinadas e que muitas vezes confere boas propriedades finais aos revestimentos (Toyserkani; Khajepour; Corbin, 2005). Por outro lado, elevadas taxas de resfriamento também podem levar à formação de tensões residuais, o que pode favorecer à formação de trincas para alguns sistemas de liga (Zhu et al., 2021). Neste contexto, torna-se pertinente a condução de investigações que indiquem as melhores condições de deposição para cada sistema de liga, incluindo os parâmetros de processo, percentual de sobreposição de cordões, número de camadas, entre outros.

As superligas são ligas especiais de engenharia que contém, como elemento majoritário, o níquel, o ferro ou o cobalto e são largamente utilizadas na engenharia de superfícies para a proteção de componentes. Um dos sistemas de liga de cobalto

de grande interesse industrial é o das Triballoys, especialmente para aplicações em desgaste metal-metal e corrosão-desgaste. Entretanto, 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, é decorrente da elevada fração de fase Laves - intermetálico da natureza frágil - que promove a formação e a propagação de trincas na liga T800®, o que eleva a susceptibilidade ao trincamento e complica o desenvolvimento de revestimentos (Stein; Leineweber, 2021). Baseado em estudo anterior (Stein; Leineweber, 2021) em que a adição de níquel à liga T800® deu origem à variante T900®, de maior tenacidade e ductilidade, o presente trabalho propõe a investigação da deposição de revestimentos funcionais de liga Tribaloy T800® produzidos a partir de diferentes aditivações da superliga de níquel Hastelloy C276®. Esta liga foi selecionada por apresentar uma boa soldabilidade e elevada ductilidade (Ferreira; Graf; Scheid, 2015; Rivero et al., 2020). Além disso, a liga de níquel apresenta baixo teor de carbono, elemento que deve ser mantido baixo para assegurar a formação de fase Laves ao invés de carbonetos, que são indesejados, neste caso.

Tendo em vista os desafios globais de sustentabilidade quanto à redução do consumo global de energia, como também para a redução dos custos industriais relacionados a problemas de desgaste e corrosão, fica evidente a importância do presente trabalho de mestrado. O objetivo desta pesquisa foi investigar as características de revestimentos funcionais de liga Tribaloy T800® aditivada com a liga Hastelloy C276® utilizando diferentes percentuais de mistura e potências de laser. O presente estudo buscou compreender os aspectos de formação dos revestimentos funcionais e tirar proveito do potencial impacto na mitigação do trincamento da liga T800®, assim como sobre a diluição, microestrutura, dureza e resistência ao risco.

1.1 JUSTIFICATIVA

Algumas linhas de pesquisa vêm propondo modificar a composição de ligas por meio da mistura ligas ou adição de elementos específicos, com o objetivo de se obter revestimentos com maior resistência ao desgaste e à corrosão e que sejam, ao mesmo tempo, livres de trincas. As abordagens experimentais também propõem o ajuste nos parâmetros de deposição para cada liga e substrato adotado, englobando a estratégia de deposição. Neste contexto, a deposição a laser da liga Tribaloy T800®

sobre aço inoxidável AISI 304 revelou alta dureza e resistência ao desgaste (Navas et al., 2006). No entanto, a elevada fração de fase Laves dura e frágil induz a nucleação e propagação de trincas durante o resfriamento dos revestimentos depositados a laser, impedindo a sua ampla utilização na forma de revestimentos (Tobar et al., 2008; Stein; Leineweber, 2021). Portanto, o presente projeto investigou revestimentos funcionais aditivados de forma conhecida e controlada como uma solução para o problema de trincamento dos revestimentos de liga Tribaloy T800®. O efeito dos percentuais de aditivação sobre a microestrutura, dureza e resistência ao risco foram também avaliados.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi investigar as características de revestimentos funcionais de liga Tribaloy T800® aditivada com a liga Hastelloy C276® utilizando diferentes potências de laser. Este estudo busca compreender os aspectos de formação dos revestimentos funcionais e tirar proveito do potencial da adição *in situ* da liga de níquel sobre a mitigação do trincamento da liga T800®, assim como sobre a diluição, microestrutura, dureza e resistência ao risco.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Avaliar o efeito da potência do laser sobre o trincamento da liga Tribaloy T800® na deposição direta sem aditivação;
- b) Conhecer o efeito do percentual de adição de liga Hastelloy C276® sobre o trincamento de revestimentos funcionais de liga Tribaloy T800®;
- c) Conhecer o efeito do percentual de adição de liga Hastelloy C276® sobre a microestrutura, dureza e resistência ao risco dos revestimentos funcionais de liga Tribaloy T800®;
- d) Analisar o efeito da potência do laser sobre a deposição de revestimentos funcionais com diferentes percentuais de adição da liga Hastelloy C276®.

1.3 METODOLOGIA

Sousa, Igami, Bido (2009) apresentam um estudo exploratório baseado no diagrama de Stokes, para uma visão não linear da pesquisa. O referido diagrama propõe um modelo de quadrantes, baseados na busca por entendimento fundamental (eixo y) e considerações sobre o uso (eixo x). O desdobramento do diagrama torna possível a realização de: (i) pesquisa científica pura (quadrante de Bohr), (ii) pesquisa básica inspirada no uso (quadrante de Pasteur) e (iii) pesquisa pura aplicada (quadrante de Edison). A presente investigação se enquadra na segunda possibilidade, na medida em que busca compreensão básica acerca do trincamento de revestimentos, inspirada nas limitações práticas da deposição da liga Tribaloy T800® e de muitos outros sistemas promissores de ligas. A pesquisa proposta tem objetivo exploratório e explicativo, e será conduzida na forma de pesquisa em laboratório com carácter de trabalho científico original.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão sobre engenharia de superfícies, processo de deposição a laser (*Laser Cladding*) e das ligas Tribaloy T800® e Hastelloy C276®.

2.1 ENGENHARIA DE SUPERFÍCIES

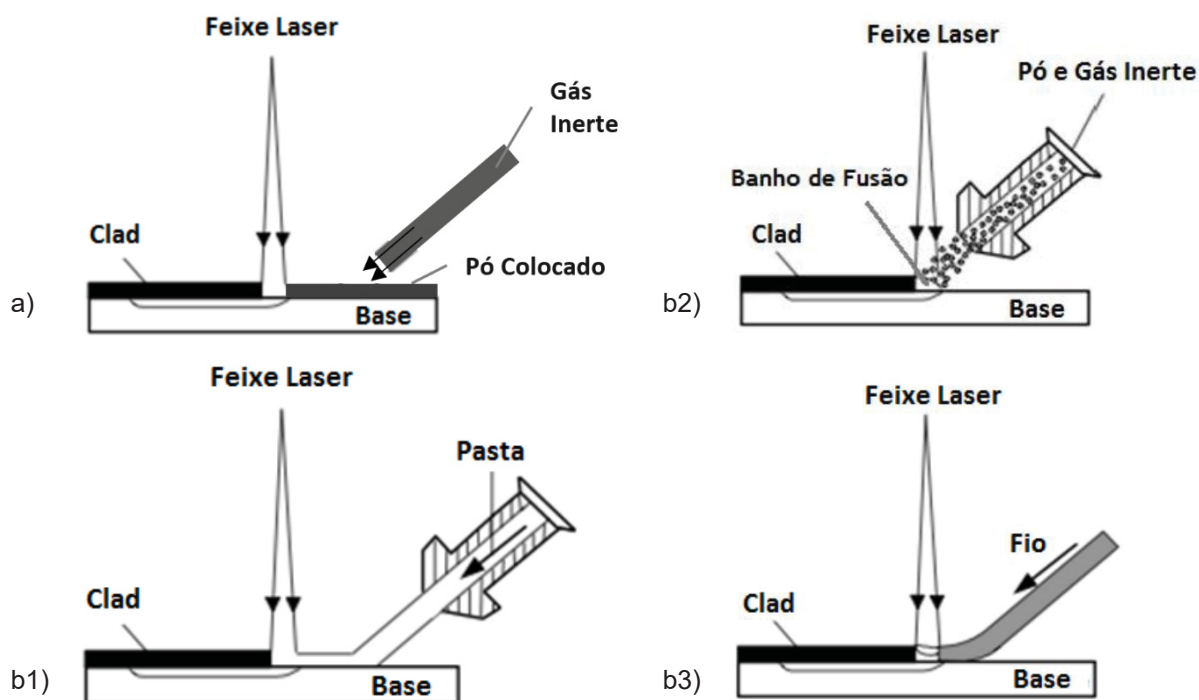
A engenharia de superfícies abrange todo o campo de pesquisa e atividade técnica voltada para o projeto, fabricação, investigação e utilização de camadas superficiais. As propriedades das camadas superficiais produzidas são avaliadas por métodos utilizados na engenharia de superfícies, usados predominantemente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

2.2 DEPOSIÇÃO A LASER – *LASER CLADDING*

O processo de deposição a laser (*Laser Cladding*) é obtido através da alimentação de um material (pó ou arame) na área focal do laser no substrato, onde o material é fundido, formando uma poça de fusão, que se solidifica à medida que o feixe de laser avança em sua trajetória (Mahamood, 2018).

Basicamente existem duas técnicas diferentes de deposição a laser: 1) processo em duas etapas (revestimento a laser com pó preposicionado); 2) processo em uma etapa com adição através de alimentadores. No processo em duas etapas, um material de revestimento é colocado sobre um substrato antes da irradiação do laser e, logo após, o laser é escaneado e funde o material de revestimento junto com um pequeno volume do substrato. Já no processo em uma etapa, o material de adição é alimentado diretamente na poça de fusão na forma de pó, arame, ou ainda na deposição de pasta (Toyserkani; Khajepour; Corbin, 2005). Os diferentes métodos de deposição a laser podem ser vistos na FIGURA 1.

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS TÉCNICAS DE DEPOSIÇÃO A LASER: (a) PROCESSO EM DUAS ETAPAS; (b) PROCESSO EM UMA ETAPA INCLUINDO: (b1) DEPOSIÇÃO DE PASTA; (b2) INJEÇÃO DE PÓ; (b3) ALIMENTAÇÃO DE ARAME



FONTE: Adaptado de Toyserkani; Khajepour; Corbin (2005).

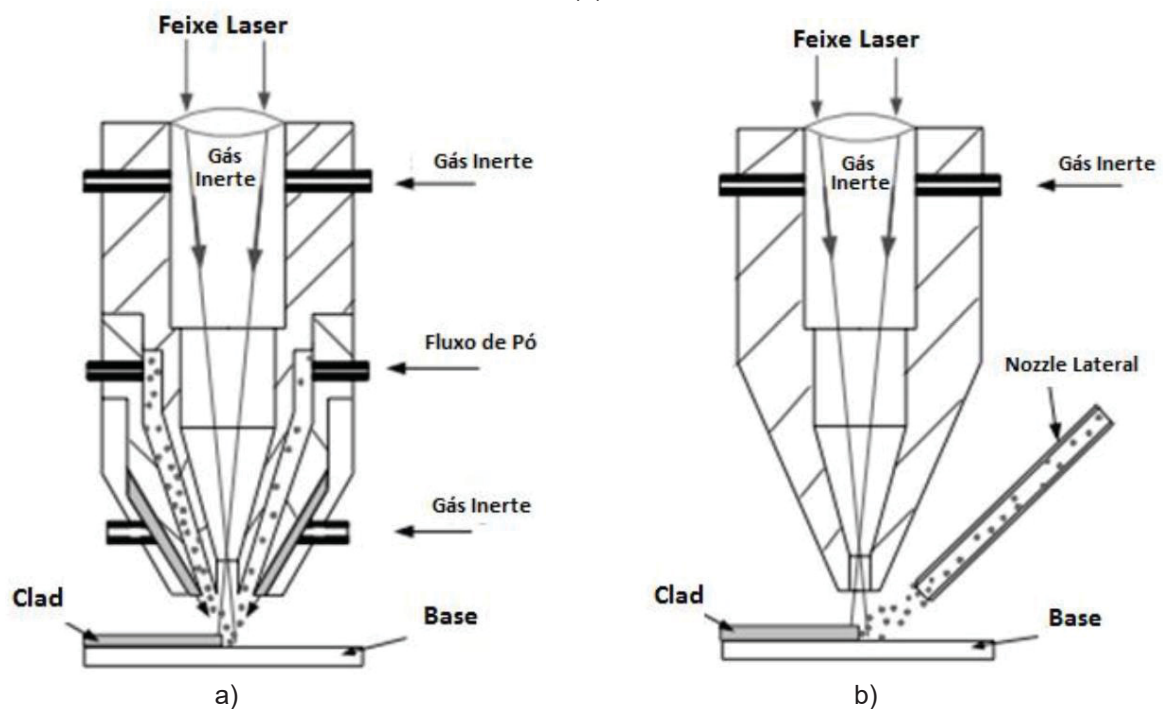
Dentre esses métodos de deposição a laser apresentados, a deposição a laser por injeção de pó tem se mostrado o mais eficaz (Toyserkani; Khajepour; Corbin, 2005). Uma das vantagens do processo de revestimento a laser ao trabalhar com pó como material de revestimento é a possibilidade de combinar diferentes ligas, misturando-as durante o processo para produzir revestimentos com a composição química desejada modificada, ou ainda, melhorar as propriedades de uma determinada liga adicionando uma certa quantidade de outra liga ou material (Muro et al., 2019).

Na técnica de *laser cladding* por injeção de pó, o bocal de alimentação do pó pode ter duas configurações básicas diferentes: lateral e coaxial. As interações das partículas de pó, do feixe de laser e do gás inerte com a poça de fusão são parâmetros importantes que influenciam na qualidade do revestimento. Para a deposição com baixa energia, as partículas podem não ser fundidas (permanecendo sólidas), resultando na colisão com o substrato não fundido e posterior ricocheteio, levando à não incorporação das mesmas na forma de revestimento. Por outro lado, o aumento do aporte térmico leva à fusão do substrato e as partículas sólidas ou líquidas que

colidem na poça de fusão são capturadas formando o revestimento. Finalmente, num último cenário, as partículas fundidas (líquidas) podem colidir em um substrato sólido também podendo ser capturadas (Toyserkani; Khajepour; Corbin, 2005).

O tipo de bocal, o ângulo do fluxo de pó, o perfil de pó na zona de processamento e o diâmetro do fluxo de pó modificam a interação do mesmo com a superfície a ser revestida. De forma geral, busca-se minimizar o impacto das partículas sólidas do pó na superfície do substrato, aumentando a captação do pó pela superfície que está sendo revestida, elevando o rendimento na deposição (Toyserkani; Khajepour; Corbin, 2005). A FIGURA 2 mostra os sistemas de distribuição de pó coaxial e lateral.

FIGURA 2 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE PÓ: (a) COAXIAL; (b) LATERAL



FONTE: Adaptado de Toyserkani; Khajepour; Corbin (2005).

Conforme a FIGURA 2, no sistema de distribuição de pó lateral o mecanismo de alimentação da matéria-prima, ou seja, o bocal, encontra-se separado. Já no sistema coaxial, a alimentação do material de adição é realizada em torno do feixe de laser (Soares, 2014).

2.2.1 Vantagens e Desvantagens do Processo

O processo de deposição a laser apresenta diversas vantagens, tanto a nível da qualidade do produto obtido, como em termos de produção industrial. Em termos de automação da produção, 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 intermédios, permitindo reduzir o tempo de produção e os custos associados (Rivero, 2019; Mazunder et al., 2000).

Uma outra vantagem da deposição a laser é a possibilidade de adição de mais de um material durante a deposição, por meio da utilização dois ou mais reservatórios de pó, os quais podem ser misturados. Permite ainda criar revestimentos ou componentes depositados na forma de camadas de diferentes materiais e composição variada. Mais uma vantagem está na capacidade de atingir zonas de difícil acesso, visto que é possível efetuar o processo juntamente com sistemas robotizados de múltiplos eixos, podendo ainda realizar a reparação de componentes ou proteção de peças novas (Soares, 2014; Rivero, 2019).

A deposição a laser tem sido amplamente utilizada no reparo de peças de máquinas e na síntese de revestimentos funcionais. Apresenta vantagens em relação aos processos convencionais de revestimento, como baixa diluição e aporte térmico baixo e localizado, resultando em pequena zona afetada pelo calor e boa aderência ao substrato, apresentando ainda melhor qualidade da superfície final (Zhu et al., 2021; Toyserkani; Khajepour; Corbin, 2005). Além disso, também apresenta alta precisão, baixa distorção e capacidade de processamento de uma larga variedade de materiais, uma vez que quase todos os materiais metálicos podem ser revestidos, como ligas de baixo ponto de fusão até ligas de alto ponto de fusão (Ocylok, 2010).

Navas et al. (2006) avaliaram aspectos como a microestrutura e comportamento em desgaste por deslizamento em revestimentos da liga Tribaloy T800® depositados sobre aço inoxidável AISI 304L por meio da técnica de *laser cladding*. Segundo os autores, com a escolha correta dos parâmetros de processamento o revestimento apresentou grau mínimo de diluição e mostrou-se livre de defeitos como trincas, porosidade e baixa união metalúrgica. O substrato com revestimento apresentou maior dureza e resistência ao desgaste por deslizamento a seco na ordem de uma a duas vezes maiores do que o substrato sem revestimento.

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 pode compensar quando comparado aos tratamentos térmicos e processamentos mecânicos posteriores à deposição do material, que são reduzidos ou até mesmo eliminados em alguns casos (Lewis; Schlienger, 2000).

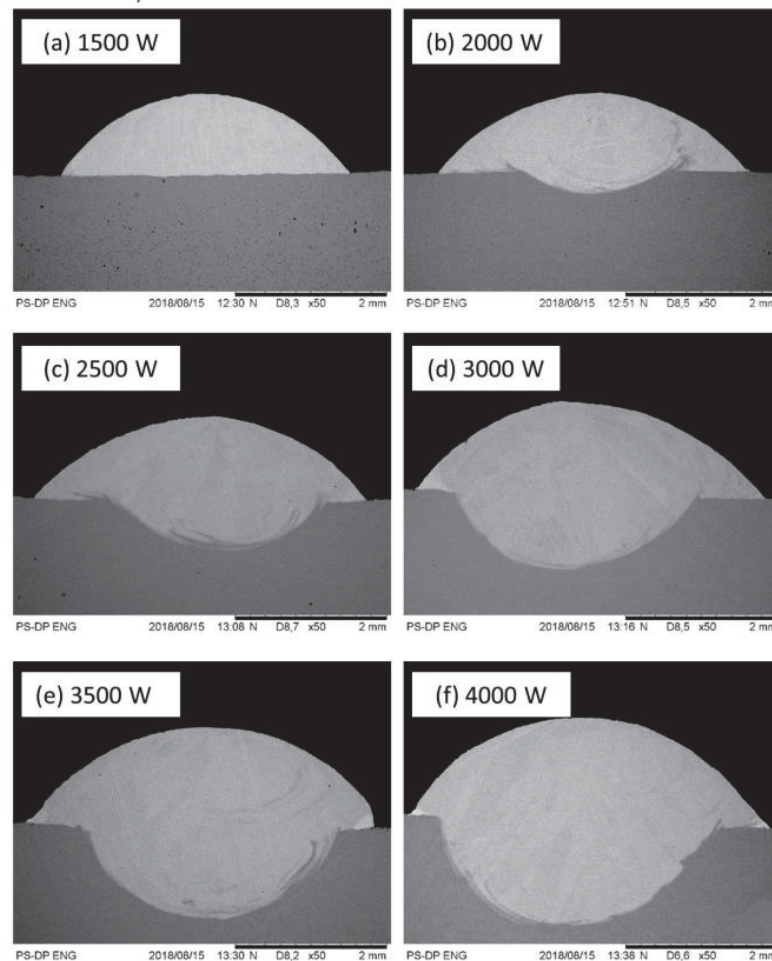
Outra restrição está relacionada à necessidade do controle dos inúmeros parâmetros do processo. A falha no controle adequado desses parâmetros pode ocasionar distúrbios no processo de deposição e consequente comprometimento da qualidade do produto final (Lin; Hwang, 1999; Soares, 2014).

2.2.2 Potência do Laser

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

A influência da potência de laser foi discutida por Rivero et al. (2020) que realizou a deposição a laser da liga Hastelloy C276[®] sobre aço inoxidável AISI 304L e ferro fundido nodular ferrítico GGG40. Os revestimentos foram depositados a partir de potências de laser 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 obteve-se boa adesão e, 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 3. O 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. Também, conforme a potência é elevada, a largura tende a se aproximar do valor nominal da mancha focal do laser. Finalmente, foi observado uma maior eficiência da fusão do pó atomizado com o aumento da potência do laser sobre o substrato de aço inoxidável AISI 304L.

FIGURA 3 – MACROGRAFIAS DOS CORDÕES DE LIGA HASTELLOY C276® DEPOSITADOS SOBRE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304L COM POTÊNCIAS ENTRE 1,5 E 4,0 kW

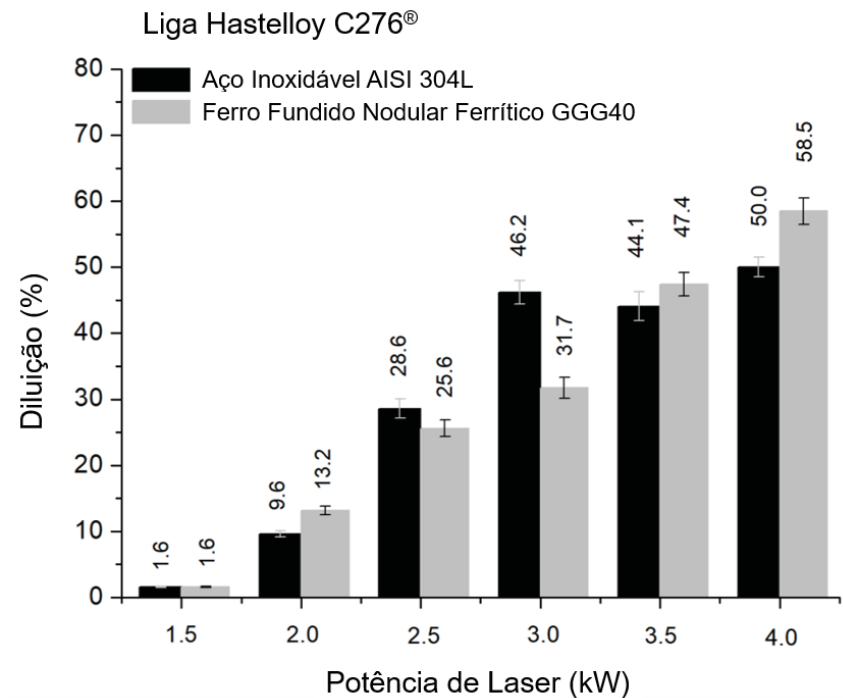


FONTE: Rivero (2019).

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. Para os revestimentos de múltiplos cordões, foi observada uma fusão mínima do substrato para potência de laser de 1,5 kW; já para a potência de 2,0 kW, observou-se a partir do terceiro cordão uma maior fusão do substrato; finalmente, para a potência de 2,5 kW obteve-se uma fusão do substrato mais notável. No estudo observou-se que a potência do laser afetou diversos outros aspectos, como ângulo de molhabilidade e a diluição da liga e, portando, a dureza dos revestimentos. Rivero et

al. (2020) também mostrou que, quanto maior a potência do laser, maior a diluição, conforme pode ser observado na FIGURA 4.

FIGURA 4 – DILUIÇÃO TÍPICA CALCULADA PELO MÉTODO DE TOYSERKANI



FONTE: Adaptado de Rivero (2020).

2.3 REVESTIMENTOS FUNCIONAIS

Os revestimentos funcionais são aqueles que apresentam composição variada, ou seja, com a presença de mais de um material ou com um gradiente composicional, possibilitando a obtenção de revestimentos com propriedades específicas. Apesar de não terem sido produzidos, na presente investigação, revestimentos de multicamadas, o estudo visa compreender o efeito das modificações composicionais e seu impacto na obtenção de revestimentos livres de trincas para a liga Tribaloy T800®, suas fases correspondentes, fração volumétrica e microestrutura. Este é um passo preliminar escolhido para a proposição futura de revestimentos de multicamadas com gradientes composicionais e microestruturais justificando, para o contexto, o uso do termo “Revestimentos Funcionais”.

O avanço da manufatura aditiva possibilita esse tipo de revestimento, pois múltiplos materiais podem ser usados simultaneamente em um único processo de

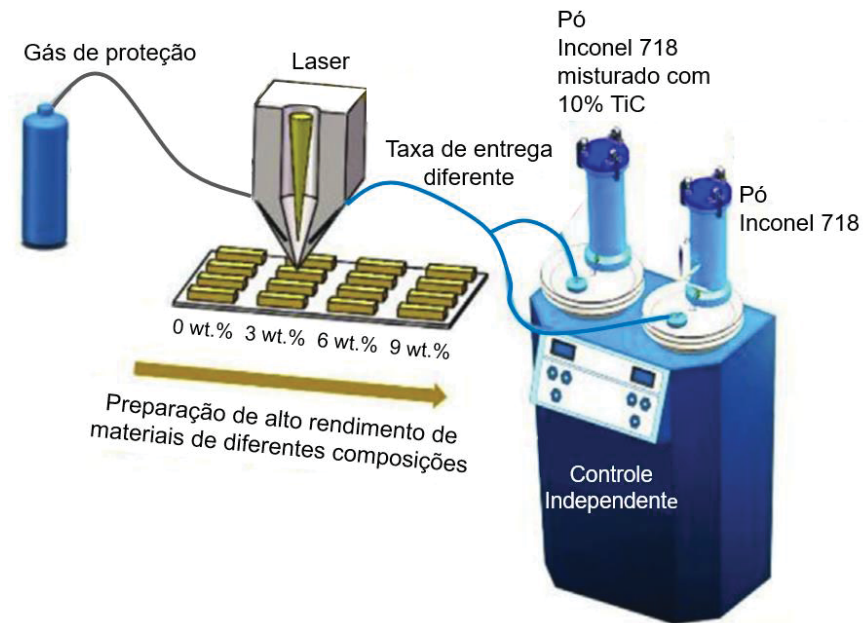
deposição a laser. Os revestimentos produzidos por materiais compostos podem ser capazes de melhorar as propriedades de superfície do substrato, especialmente para a resistência ao desgaste e à corrosão. O processo de deposição a laser também permite reparar peças desgastadas de alto valor agregado ou ainda, construir uma peça totalmente nova. Essas aplicações são importantes para aumentar o ciclo de vida das peças e reduzir a sucata, o que contribui para reduzir o aquecimento global (Mahamood, 2018).

Estudos realizados anteriormente mostram a eficácia da deposição de materiais compostos obtidos através da mistura de diferentes pós de ligas. A deposição de materiais compostos pode ser feita com um sistema coaxial de dupla alimentação, de forma que são misturados *in situ* pós de ligas diferentes para se obter características específicas no revestimento (Pizzatto et al., 2021; Thomas et al., 2020).

Muro et al. (2019) utilizou um sistema de revestimento a laser com uma mistura de pós de liga Inconel 625 e aço AISI H13, no qual a mistura dos pós foi feita através de um sistema de dupla alimentação. Os pós foram alimentados por tubos independentes e introduzidos no cabeçote do laser, onde a mistura foi produzida. Os autores relatam resultados satisfatórios para a deposição utilizando esse sistema de alimentação de pós.

Seguindo o mesmo princípio, Kong et al. (2019) utilizou um sistema de deposição a laser de alto rendimento com dupla alimentação conforme o esquema mostrado na FIGURA 5. Foram utilizados dois sistemas independentes que controlam a massa dos pós alimentados que, desta forma, controlam o teor de TiC (intervalo de 0 a 10% em peso) das amostras fabricadas. As amostras com diferentes porcentagens de TiC foram depositadas sobre uma placa, que demonstrou a vantagem da preparação de alto rendimento com o sistema de dupla alimentação.

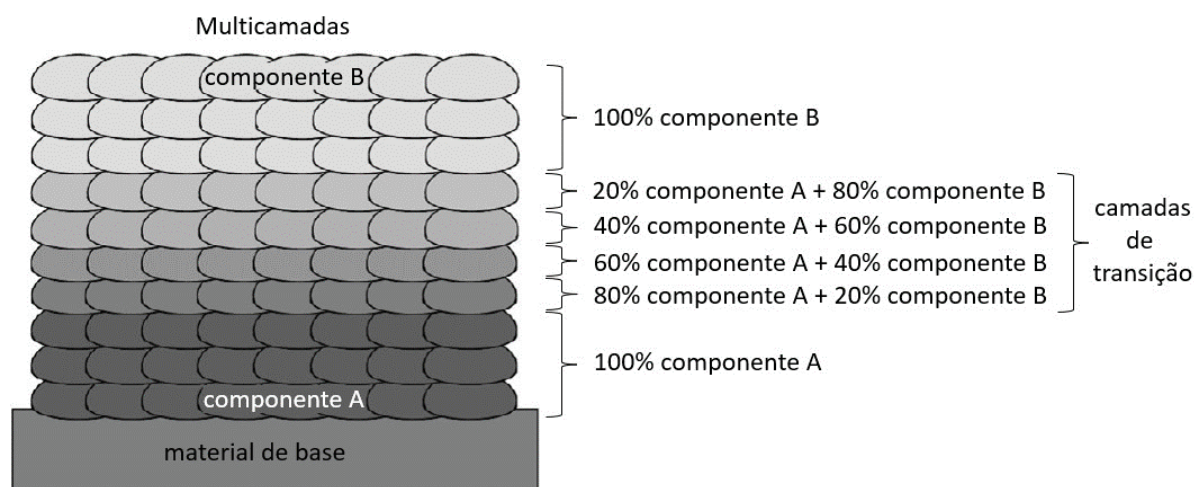
FIGURA 5 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DUPLA PARA FABRICAR A LIGA INCONEL 718 COM VÁRIAS PORCENTAGENS DE TiC



FONTE: Adaptado de Kong et al. (2019).

Ocylok, Weisheita e Kelbassa (2010) realizam estudo de deposição a laser em ferramentais fundidos em alumínio em que, em resultado de altas tensões devido a ciclos termodinâmicos, em determinadas regiões do molde o ferramental sofria trincas prematuras. A deposição a laser tinha como objetivo conferir maior dureza, resistência à corrosão e resistência à choque térmico, o que já seria alcançado com uma única camada, porém a grande diferença entre o material do molde e o material de adição poderiam causar falhas por fadiga prematuras. Diante disso, foi realizada a deposição em várias camadas, sendo que nas primeiras camadas foi feita a deposição de um material com maior ductilidade e, gradativamente foi aumentada a concentração do material desejado nas diversas camadas, até atingir a concentração de 100% na última camada, conforme pode ser visto na FIGURA 6. Este estudo envolveu um alimentador de pó duplo formando multicamadas com concentrações diferentes de cada pó.

FIGURA 6 – DESENHO ESQUEMÁTICO DA CONSTRUÇÃO DE CAMADAS GRADUADAS



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

2.4 LIGA DE REVESTIMENTO TRIBALLOY T800®

As ligas da família Tribaloy são compostas basicamente por cobalto, cromo e molibdênio, podendo ter também em sua composição o ferro, tungstênio e níquel. A liga Tribaloy T800® tem como elementos base o cobalto, o cromo, o molibdênio e o silício, mantendo o carbono em baixo percentual (Mankins; Lamb, 1992). O QUADRO 1 apresenta a composição e propriedades dessa liga.

QUADRO 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES DA LIGA TRIBALLOY T800®

Composição Química (%w.t.)	
Mo - 29	Co - Bal.
Cr - 17,5	
Si - 3,5	
C - 0,08 (máx)	
Propriedades	
Dureza	58 HRC
Densidade	8,6 g/cm³
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)
Resistência Mecânica	710 MPa
Condutividade Térmica	14,3 W/m.K

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

As ligas Tribaloy apresentam uma fase intermetálica dura de Laves dispersa em uma matriz de solução sólida em cobalto de baixa dureza ou ainda lamelar eutética (Co + Laves). A resistência ao desgaste dessas ligas depende da fração volumétrica de fase Laves (Deloro, 2023). De acordo com Mankins e Lamb (1992) as ligas Tribaloy geralmente são resistentes ao desgaste, resistentes à corrosão e resistentes às altas temperaturas. Muitas das suas propriedades vêm da natureza cristalográfica do cobalto, dos efeitos de endurecimento por solução sólida do cromo, tungstênio e molibdênio e da fração de fase Laves, tendo a resistência à corrosão conferida pelo elevado teor de cromo e molibdênio.

As ligas Tribaloy são usadas em aplicações sujeitas a desgaste, corrosão e alta temperatura. O alto teor de molibdênio resulta em boas propriedades de lubrificidade a seco, tornando essas ligas especialmente adequadas neste cenário (Stein; Leineweber, 2021). As boas propriedades dessas ligas e também a preocupação ambiental com as técnicas de revestimento de cromo duro, tornam as ligas Tribaloy alternativas eficazes de revestimento para peças de máquinas sujeitas a altas exigências em termos de desgaste e resistência à corrosão (Tobar et al., 2008).

A liga Tribaloy T800® foi projetada para resistir ao desgaste e à abrasão em altas temperaturas e tem grande resistência à oxidação e corrosão devido ao alto teor de cromo em sua composição. Também apresenta excelente resistência à corrosão em ácido acético, ácido fosfórico e ácido sulfúrico (Deloro, 2023).

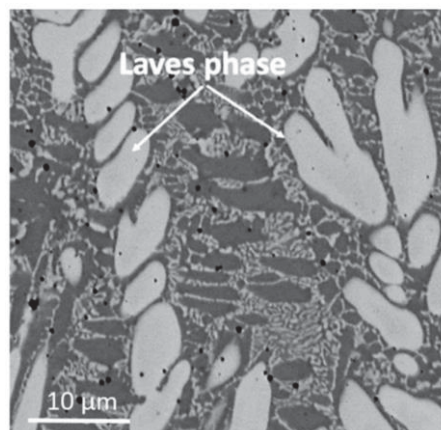
Existe uma gama ampla de condições de uso bem-sucedidas para as ligas com fase Laves, incluindo o armazenamento de hidrogênio (Hydraloy), sensores magneto-mecânicos e atuadores (Terfenol), ou mesmo na forma de revestimentos resistentes ao desgaste e à corrosão. Recentemente, foi reconhecida a possibilidade de reforço de aços a partir do controle adequado do processo de precipitação. Com base nesses conhecimentos, foram desenvolvidos novos conceitos para projetar aços ferríticos melhorados e aços austeníticos de alta temperatura. Além de sua relevância no reforço de ligas para aplicações estruturais e sua utilização em várias aplicações funcionais, a fase Laves também são adequadas para estudar propriedades fundamentais de fase intermetálicas (Stein; Leineweber, 2021).

Apesar da fase Laves apresentar diversas características desejáveis, a natureza frágil da fase Laves promove a formação e propagação de trincas na liga T800®, o que torna complexo o desenvolvimento de revestimentos (Stein; Leineweber, 2021; Tobar et al., 2008). A fim de tentar reduzir a possibilidade de trincamento da liga

T800® foi desenvolvida uma nova liga da mesma família, a Tribaloy T900®, na qual o aumento na quantidade de níquel da liga e redução do cobalto e do molibdênio é possível aumentar a ductilidade do material (Tobar et al., 2008). Dessa forma, conclui-se que é possível melhorar as características da T800® a fim de produzir revestimentos funcionais.

Como exemplo da fase Laves, a FIGURA 7 mostra a microestrutura do revestimento a laser da liga Tribaloy T800® em um substrato de superliga à base de níquel. A microestrutura da liga Tribaloy T800® consiste em grandes partículas primárias da fase Laves em uma matriz de solução sólida de cobalto e fase eutética lamelar de cobalto e Laves (Stein; Leineweber, 2021; Durejko et al., 2019).

FIGURA 7 – MICROESTRUTURA DO REVESTIMENTO A LASER DA LIGA TRIBALOY T800® SOBRE UM SUBSTRATO À BASE DE NÍQUEL.



FONTE: Adaptado de DUREJKO et al. (2019).

2.5 LIGA DE REVESTIMENTO HASTELLOY C276®

As ligas da família Hastelloy® são compostas basicamente por níquel, cromo e molibdênio, algumas também possuem em sua composição o ferro e outros elementos como nióbio, cobalto, cobre e tungstênio. A superliga Hastelloy C276® tem como elementos base o níquel, cromo e molibdênio com adição de tungstênio (Rivero, 2019). O QUADRO 2 apresenta a composição e propriedades dessa liga.

QUADRO 2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES DA LIGA HASTELLOY C276®

Composição Química (%w.t.)	
Mo - 15...17	V - 0,35
Cr - 14,5...16,5	Ni - Bal.
Fe - 4...7	
W - 3...4,5	
Co - 2,5	
Mn - 1	
Si - 0,08	
C - 0,01	
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
Módulo de Elasticidade	205 GPa

FONTE: Adaptado de Mankins; Lamb (1992).

As ligas à base de níquel são usadas em diversas aplicações em que são submetidas a altas temperaturas, também oferecem excelente resistência à corrosão em muitos meios corrosivos severos (Mankins; Lamb, 1992).

Segundo Ferreira (2014), devido ao alto teor de níquel e molibdênio, a liga Hastelloy C276® possui elevada resistência à corrosão por pites, e boa resistência a meios oxidantes, conferida pelo cromo em sua composição. Além disso possui resistência à meios químicos com oxidantes fortes como o férrico, cloretos cúpricos, cloro, ácido fórmico, ácido acético, anidrido acético, água do mar e soluções salinas.

A liga Hastelloy C276® apresenta baixo teor de carbono, o que minimiza a precipitação de carbonetos durante processos de soldagem ou deposição da liga, mantendo a resistência à corrosão intergranular em zonas termicamente afetadas resultantes dos ciclos térmicos da soldagem (Special Metals Corporation, 2004).

Devido à sua composição química e características, a liga Hastelloy C276® é empregada em processos químicos, controle de poluição, na indústria de produção de papel celulose, tratamento de resíduos industriais e urbanos, recuperação de gases, controle de poluição, rede de dutos, amortecedores, pilha de gás de sistemas de reaquecimento, sistemas de ventilação, sistemas de trocadores de calor, entre outras aplicações (Ferreira, 2014).

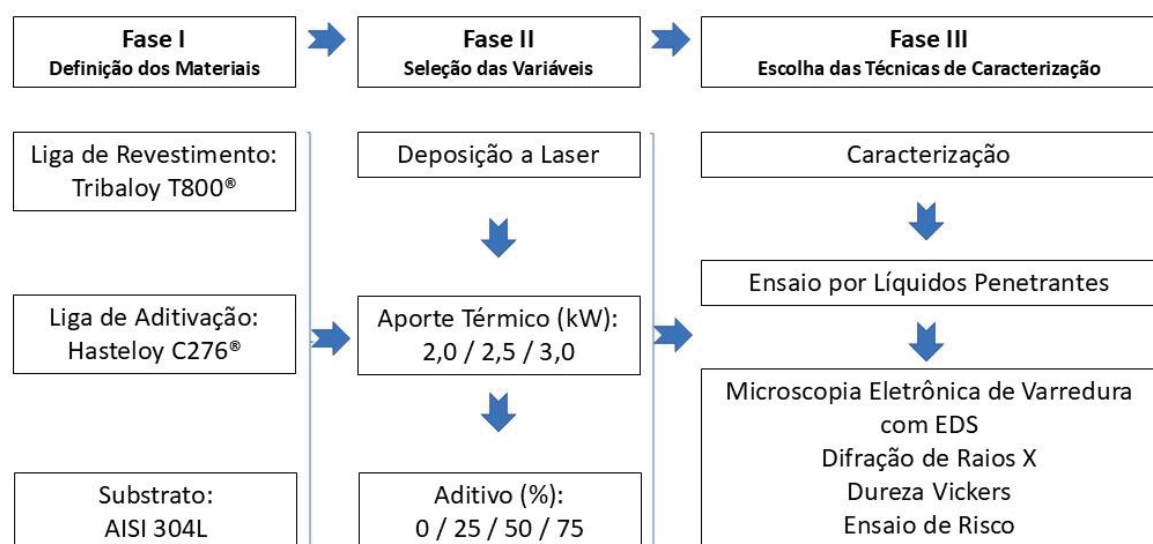
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão detalhados o fluxograma de pesquisa, os materiais e os processos, incluindo os parâmetros adotados na deposição dos revestimentos funcionais, a fim de se permitir sua reprodução.

3.1 FLUXOGRAMA DA PESQUISA

A FIGURA 8 apresenta o fluxograma da pesquisa, detalhando as principais condições experimentais e avaliações propostas.

FIGURA 8 – FLUXOGRAMA EXPERIMENTAL DA PESQUISA



FONTE: O Autor (2023).

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Este trabalho adotou a liga Tribaloy T800® como liga de deposição e a Hastelloy C276® como liga de aditivação, ambas na forma de pó atomizado a gás, com tamanhos de partículas de 53 a 150 µm (QUADRO 3). Os pós foram depositados em um centro de deposição com um laser de diodo de alta potência sobre substratos na forma de placas de aço inoxidável AISI 304L com espessura de 12 mm.

QUADRO 3 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS LIGAS

Material	Composição química (%)					
Liga Principal	Ni	Cr	Mo	C	Si	W
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 à sua elevada dureza e resistência ao desgaste, porém, é uma liga muito susceptível ao trincamento durante a deposição. A liga Hastelloy C276® foi selecionada para aditivação devido à sua excelente resistência à corrosão e à formação de pites em ambientes agressivos de operação, apresentando ainda alto cromo e molibdênio, além de baixo teor de carbono. Portanto, a composição química da liga Hastelloy C276® se mostra interessante para a modificação do sistema de ligas Tribaloy.

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 QUADRO 4.

QUADRO 4 – 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:

- Limpeza: as chapas dos substratos foram usinadas a fim de assegurar as superfícies planas e então retificadas até a espessura de 12 mm;
- Corte: as chapas foram então cortadas em tamanho menor a fim de facilitar o manuseio e facilitar o processo de disposição;

- Preparação fina da superfície: depois de retificadas, todas as placas passaram por processo de jateamento com granalha de aço para uniformização da rugosidade, o que contribui para a absorção homogênea da energia do laser.

3.4 PROCESSO DE DEPOSIÇÃO – LASER CLADDING

O processo de deposição usado nesse trabalho foi o *laser cladding* com um sistema duplo de alimentador de pó. Isto permitiu a alimentação concomitante das duas ligas acima descritas. O laser usado é de diodo de alta potência (comprimento de onda entre 980 e 1060 nm) conduzido por fibra ótica até o cabeçote. Os revestimentos foram depositados e avaliados visualmente quanto à qualidade superficial e aderência revestimento-substrato.

A deposição dos revestimentos foi feita em múltiplos cordões com as potências de 2,0-, 2,5-, e 3,0 kW para a liga Tribaloy T800® sem aditivação e para a liga Tribaloy T800® com aditivação da liga Hastelloy C276® em diferentes proporções, conforme mostrado na TABELA 1. As amostras 8 e 9 apresentaram grande incidência de trincas, tornando-se inviáveis para esta pesquisa, portanto foram desconsideradas na caracterização dos resultados.

TABELA 1 – CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

Amostra	T800® (%)	C276® (%)	Potência (kW)
1	100	0	2,0
2	100	0	2,5
3	100	0	3,0
4	50	50	2,0
5	50	50	2,5
6	50	50	3,0
7	75	25	2,0
8	75	25	2,5
9	75	25	3,0
10	25	75	2,0
11	25	75	2,5
12	25	75	3,0

FONTE: O Autor (2024).

A escolha das potências do laser na deposição foi baseada em trabalhos anteriores, onde foi possível observar que para potências abaixo 2,0 kW, a diluição é quase nula, resultando numa fusão mínima, o que não é desejado, conforme mostrado por Pizzatto (2020) na deposição da liga C276[®] sobre o aço inoxidável 304L, portando foi escolhida a potência de 2,0 kW como inicial para este trabalho. Já para potências acima de 3,0 kW obtém-se uma grande diluição com o substrato, conforme mostrado por Rivero (2019) ao depositar a liga Hastelloy C276[®] sobre o aço 304L, porém, visto que o objetivo é obter revestimentos com baixa diluição, optou-se por estabelecer a potência máxima de 3,0 kW para este trabalho.

O equipamento usado para a deposição é da marca PRECO, modelo SL 9000 Series[®]. 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 grau de sobreposição de cordões (FIGURA 9). O QUADRO 5 apresenta os parâmetros de deposição dos revestimentos.

FIGURA 9 – INSTALAÇÕES GERAIS DO EQUIPAMENTO LASER CLADDING FABRICANTE PRECO



FONTE: Rivero (2019).

QUADRO 5 – PARÂMETROS CONTROLADOS DE DEPOSIÇÃO DOS REVESTIMENTOS

Condição	#1	#2	#3
Potência (kW)	2,0	2,5	3,0
Liga Principal		Tribaloy® T800®	
Liga de Aditivação		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	
Percentual de Aditivação de C276® (%)		0, 25, 50, 75	

FONTE: O Autor (2023).

3.5 RETIRADA DAS AMOSTRAS PARA CARACTERIZAÇÃO

3.5.1 Eletroerosão a fio

A eletroerosão a fio foi escolhida para a remoção das áreas revestidas da chapa de substrato. 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 10 – EQUIPAMENTO DE CORTE POR ELETROEROSÃO CHARMILLES ROBOFIL 290P®



FONTE: Rivero (2019).

3.5.2 Ensaio por Líquido Penetrante

Para identificar possíveis falhas na estrutura de um material sem danificá-lo, podem ser realizados ensaios não destrutivos como o ensaio por líquido penetrante. Esta técnica pode é capaz de detectar descontinuidades superficiais no material, como trincas, dobras, encolhimento e falta de fusão, dentre outras deformidades, que podem comprometer a resistência e qualidade da peça. Pode ser aplicada em uma grande variedade de materiais não porosos, metálicos, ferrosos metais e não ferrosos, materiais não metálicos como cerâmicas esmaltadas não porosas ou totalmente densa, bem como certos plásticos não porosos e vidro (ASTM E165/E165M, 2018).

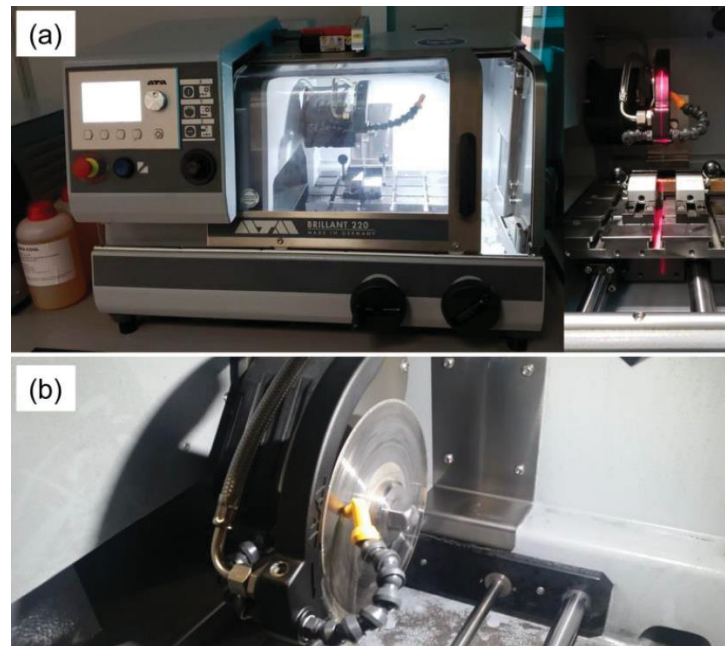
O líquido penetrante pode consistir em material visível ou fluorescente à base de água ou óleo. Neste trabalho foi utilizado um líquido visível para detecção de trincas VP-30 Spray Aerosol da marca Metal Chek, cor vermelha. Após a limpeza das amostras, o líquido penetrante é aplicado uniformemente sobre a superfície a ser examinada onde ocorre a penetração capilar por cavidades. Após um tempo de permanência adequado, o excesso de penetrante superficial é removido. Um revelador é aplicado para retirar o penetrante aprisionado na descontinuidade de forma que é possível identificar se há defeitos na superfície. Para este trabalho foi utilizado o óleo revelador de trincas D-70 Spray Aerosol não aquoso da marca Metal Chek.

3.5.3 Processo de corte em seção transversal

Os revestimentos removidos das chapas de substrato foram então cortadas em uma 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. O equipamento possui abertura frontal e iluminação interna por lâmpadas led com refrigeração à água.

Neste estudo, foi utilizado um 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. A FIGURA 11 apresenta a visão geral do equipamento (a) e o detalhe do disco de corte diamantado e sistema de fixação da amostra (b).

FIGURA 11 – SECCIONADORA BRILLANT 220®



FONTE: Rivero (2019).

3.5.4 Embutimento Metalográfico

Após o corte, as amostras foram embutidas a quente em resina polimérica termofixa do tipo baquelite em equipamento ATM, modelo OPAL 410® (FIGURA 12). Trata-se de uma prensa hidráulica de embutimento a quente refrigerada a água. Possui um conjunto de moldes, com diâmetros de 25 até 40 mm, que podem ser trocados de forma manual e até 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 entre 20 à 200°C.

FIGURA 12 – EQUIPAMENTO DE EMBUTIMENTO A QUENTE OPAL 410® - ATM



FONTE: Rivero (2019).

3.5.5 Lixamento e Polimento

As amostras embutidas foram lixadas a partir de granulometrias #120, #220, #320, #400, #600 e #1200 e polidas de forma semiautomática com pasta de diamante de 3 e 1 μm até o espelhamento da superfície.

3.6 DILUIÇÃO DOS REVESTIMENTOS

A diluição dos revestimentos foi calculada a partir do teor de ferro dos materiais de adição, da densidade das ligas e do teor de ferro medido por espectrometria por energia dispersiva (EDS), a partir do 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 do teor de ferro:

η é a diluição

ρ_c é a densidade da liga de revestimento

ρ_s é a densidade do substrato

X_s é o teor de ferro do substrato

X_c é o teor de ferro do revestimento

X_{c+s} é o teor de ferro do revestimento após a deposição

3.7 MICROSCOPIA 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 ferro (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. Foi selecionada uma área dentro revestimento com medidas 0,5 x 0,5 mm² para a análise semi-quantitativa dos elementos. 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 químico da microestrutura, análise química em uma área, ponto ou ainda uma varredura em linha.

Sabe-se que cada elemento químico possui uma estrutura atômica única em que os elétrons são distribuídos em camadas. A excitação dos elétrons faz com que eles mudem de camadas gerando a emissão de raios X característicos, dessa forma é possível realizar uma análise semiquantitativa, mapeando a composição das fases e microestrutura dos materiais (Rivero, 2019).

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 de 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 após esta superfície ser retificada e preparada a partir de lixamento e polimento metalográfico.

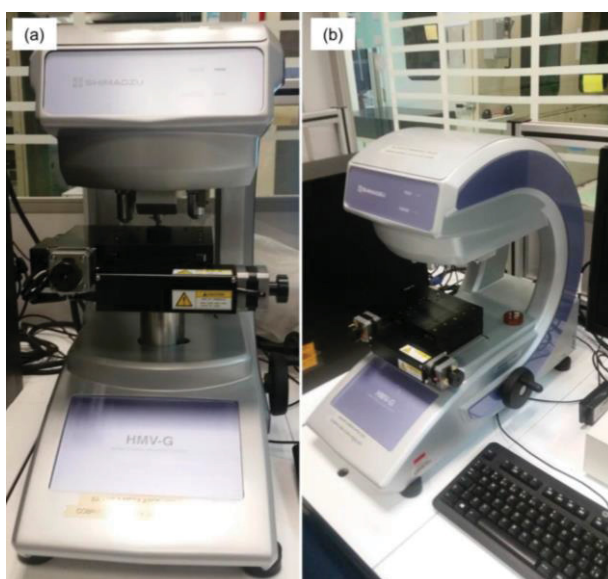
Para as análises utilizou-se a radiação K- α Cu com varredura 2θ de 20° a 120° , passo angular de $0,05^\circ$ e tempo de exposição por canal de 1s. Foi utilizado um difratômetro modelo Shimadzu XRD-7000 para as varreduras, enquanto a análise dos picos de difração foi realizada a partir do software *Crystallographica Search Match*.

3.9 ENSAIOS MECÂNICOS

3.9.1 Ensaio de dureza Vickers

O ensaio de dureza Vickers teve como objetivo avaliar a influência da potência do laser e do percentual de aditivção sobre os revestimentos de liga Tribaloy T800®. O equipamento utilizado foi do fabricante Shimadzu, modelo HMV-G Series®, mostrado na FIGURA 13.

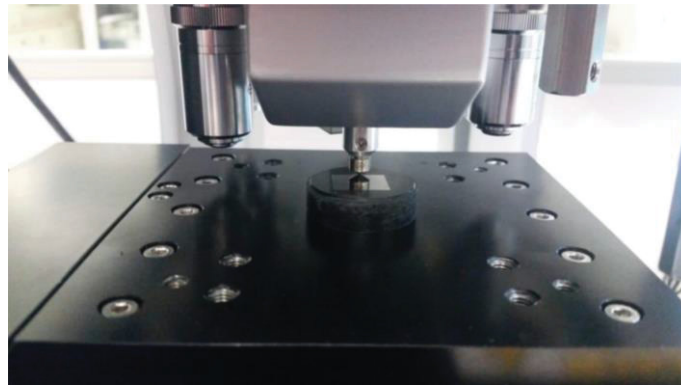
FIGURA 13 – EQUIPAMENTO UTILIZADO NO ENSAIO DE DUREZA VICKERS HMV-G SERIES®



FONTE: Rivero (2019).

O durômetro do equipamento opera de forma automatizada quanto à medição das diagonais das indentações, reduzindo os erros de medição. 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 14 – INDENTADOR E LENTES DO EQUIPAMENTO HMV-G SERIES®



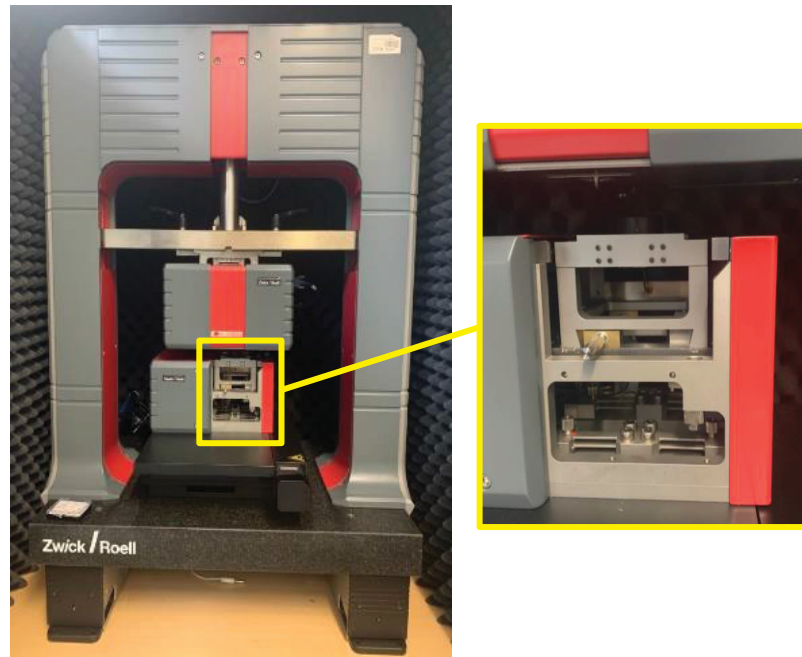
FONTE: Rivero (2019).

O ensaio de dureza foi feito em seção transversal nos revestimentos, foram realizadas três medições e depois foi obtida a média aritmética dos valores medidos.

3.9.2 Ensaio de Risco

Para a realização do ensaio de risco foi utilizado o equipamento UNAT do fabricante Zwick Roell®, conforme mostrado na FIGURA 15, com o uso do software de automação Asmec GMBH - Inspector X.

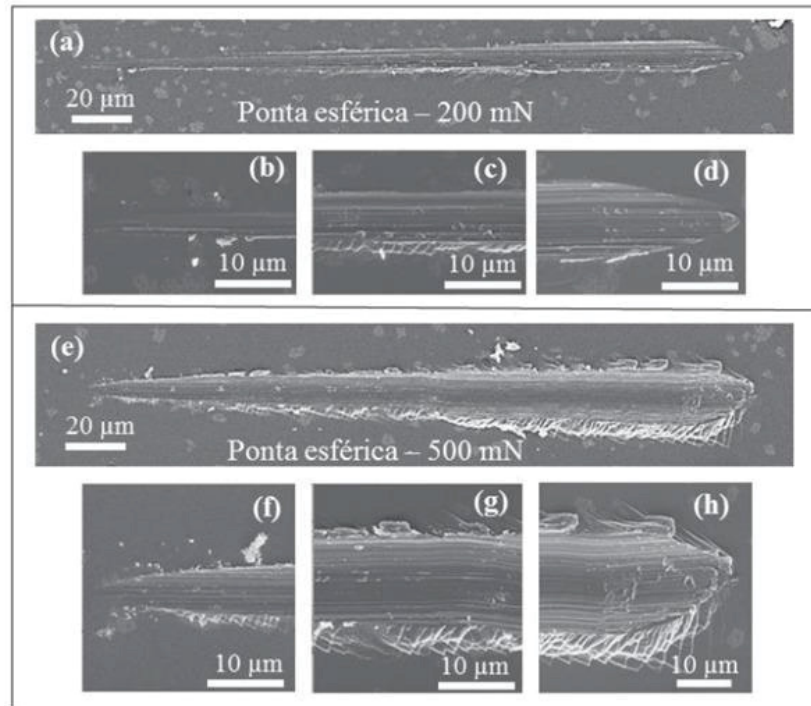
FIGURA 15 – EQUIPAMENTO MARCA UNAT ZWICK ROELL®



FONTE: O autor (2024).

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. Nesse ensaio, é possível aumentar gradativamente a força aplicada em um indetador, 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 16 traz um exemplo onde o ensaio de nano 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.

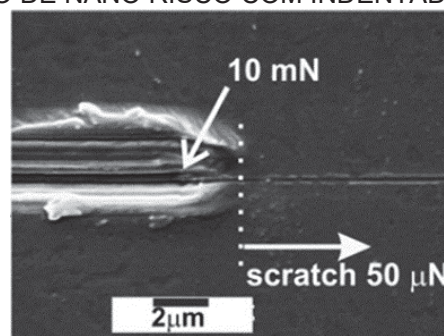
FIGURA 16 – ENSAIO DE NANO RISCO COM INDENTADOR TIPO ESFÉRICO



Fonte: Luz (2019).

Lepienski et al. (2011) também realizou 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 17. Os trabalhos realizados anteriormente com ensaio de risco mostram a eficiência desse tipo de ensaio para se obter informações referentes à resistência ao desgaste por fricção.

FIGURA 17 – ENSAIO DE NANO RISCO COM INDENTADOR TIPO BERKOVICH



Fonte: Lepienski et al. (2011).

Na presente investigação, foram realizados ensaios de risco para avaliar a resistência ao risco das diferentes microestruturas obtidas nos revestimentos de liga Tribaloy T800® sem aditivação e nos revestimentos funcionais de liga Tribaloy T800®

aditivada com Hasteloy C276[®]. 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. 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 média total do risco e comparados para cada condição estudada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico são apresentados e discutidos os resultados desta pesquisa. Os revestimentos foram caracterizados quanto ao aspecto visual após ensaio por líquido penetrante, macroestrutura, diluição, microestrutura, fases formadas, dureza e resistência ao risco.

4.1 DEPOSIÇÃO DIRETA DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA (CONDIÇÃO DE REFERÊNCIA)

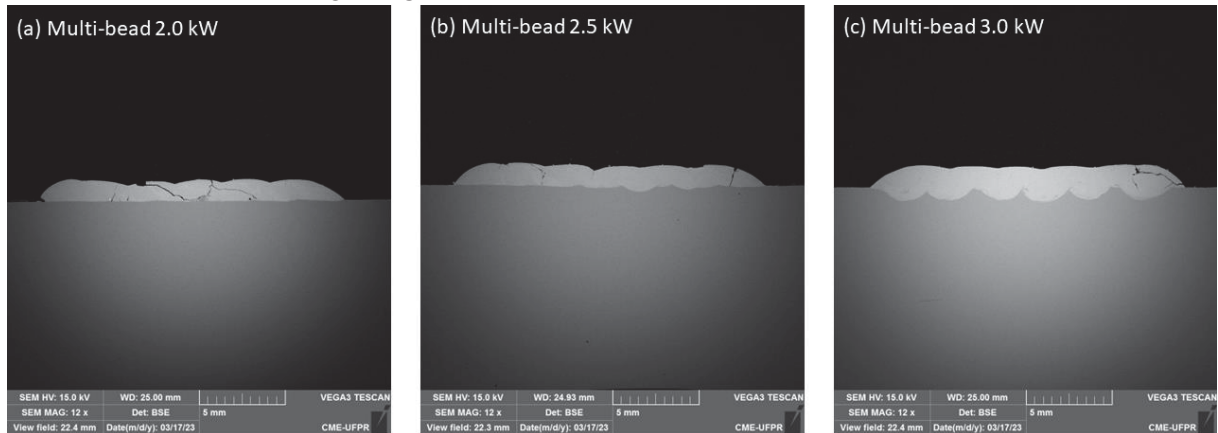
Neste item serão apresentados os resultados obtidos com a deposição direta da liga Triballoy T800® para as potências de laser de 2,0-, 2,5- e 3,0 kW.

4.1.1 Macroestrutura e Líquido Penetrante

A análise dos revestimentos em secção transversal apresentou diferenças significativas na geometria dos cordões estudados em decorrência das diferentes potências de laser utilizadas. A FIGURA 18 mostra a visão da macrografia dos revestimentos. Observa-se uma maior diluição para maiores aportes térmicos (ou potências de laser), o que está de acordo com resultados obtidos em estudos realizados anteriormente (Silva, 2019). Aparentemente ocorre um maior trincamento em uma das extremidades dos revestimentos, principalmente nas amostras depositadas com potência de 2,5 kW e 3,0 kW, este trincamento provavelmente ocorre no primeiro cordão depositado, já nos demais cordões, devido ao substrato já estar mais aquecido, o trincamento torna-se menos evidente. De forma geral, a intensidade de trincamento é menor para a potência do laser de 3,0 kW, que pode ser confirmado através da FIGURA 19, na qual são apresentados os resultados da inspeção não destrutiva no topo de revestimentos através do ensaio por líquido penetrante, revelando a intensidade do trincamento das amostras.

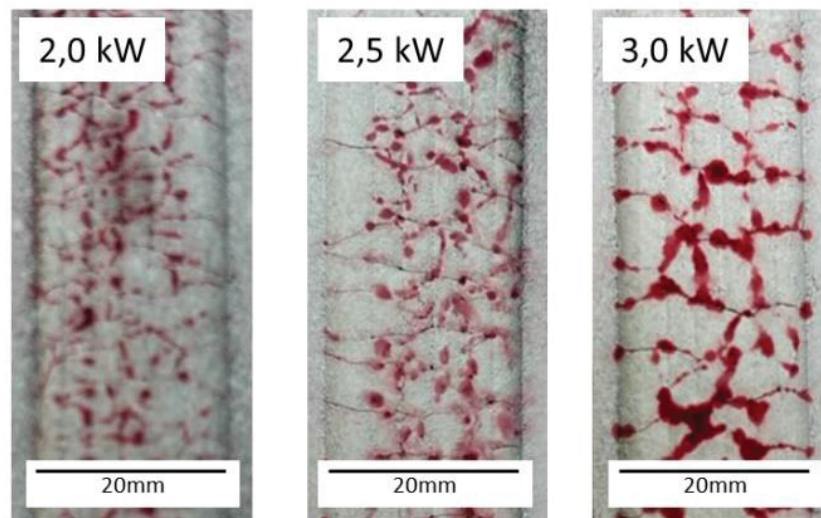
No presente estudo, é possível sugerir que quanto maior a potência de laser maior o aquecimento do substrato, promovendo uma atenuação da taxa de resfriamento, o que pode estar contribuindo para reduzir a intensidade do trincamento. Como evidência, observa-se o aumento do espaçamento entre trincas, por sua vez, indicando um caminho de investigação promissor (FIGURA 19).

FIGURA 18 – ANÁLISE MACROGRÁFICA DOS REVESTIMENTOS COM T800® SEM ADITIVAÇÃO PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS



FONTE: O Autor (2024).

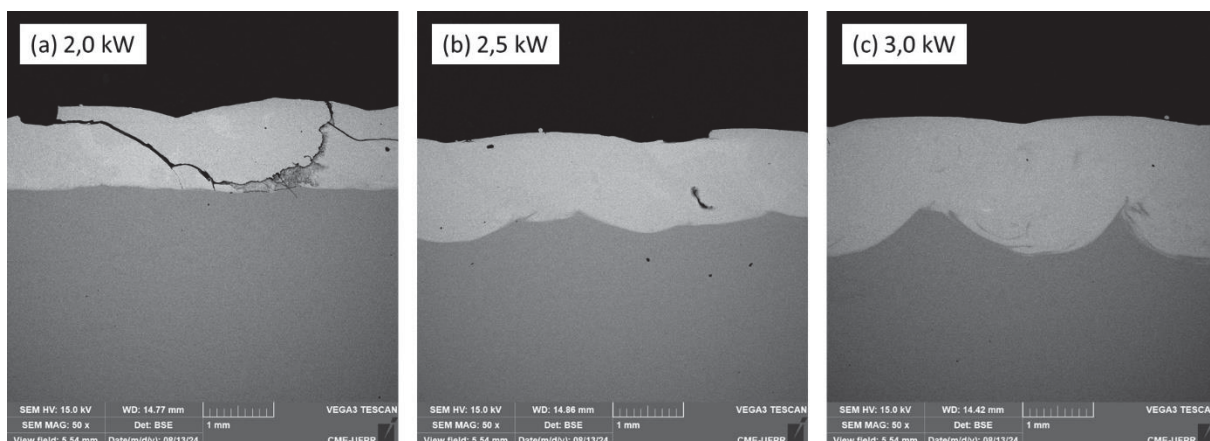
FIGURA 19 – ENSAIO POR LÍQUIDO PENETRANTE DOS REVESTIMENTOS COM T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS



FONTE: O Autor (2024).

A FIGURA 20 mostra a macrografia dos revestimentos com ampliação um pouco superior ao da FIGURA 18. Verifica-se com mais detalhes o trincamento mais crítico observado para os revestimentos depositados com a potência de laser de 2,0 kW.

FIGURA 20 – MACROGRAFIA DOS REVESTIMENTOS DA LIGA T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS

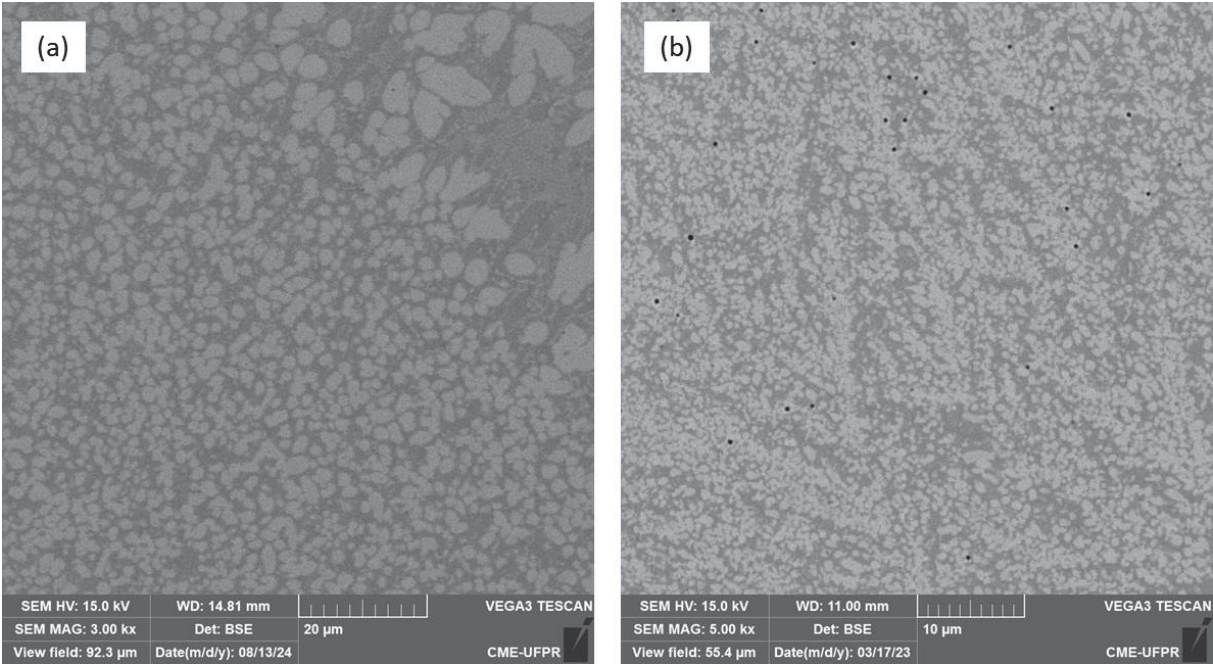


FONTE: O Autor (2024).

4.1.2 Microestrutura e Difração de Raios X

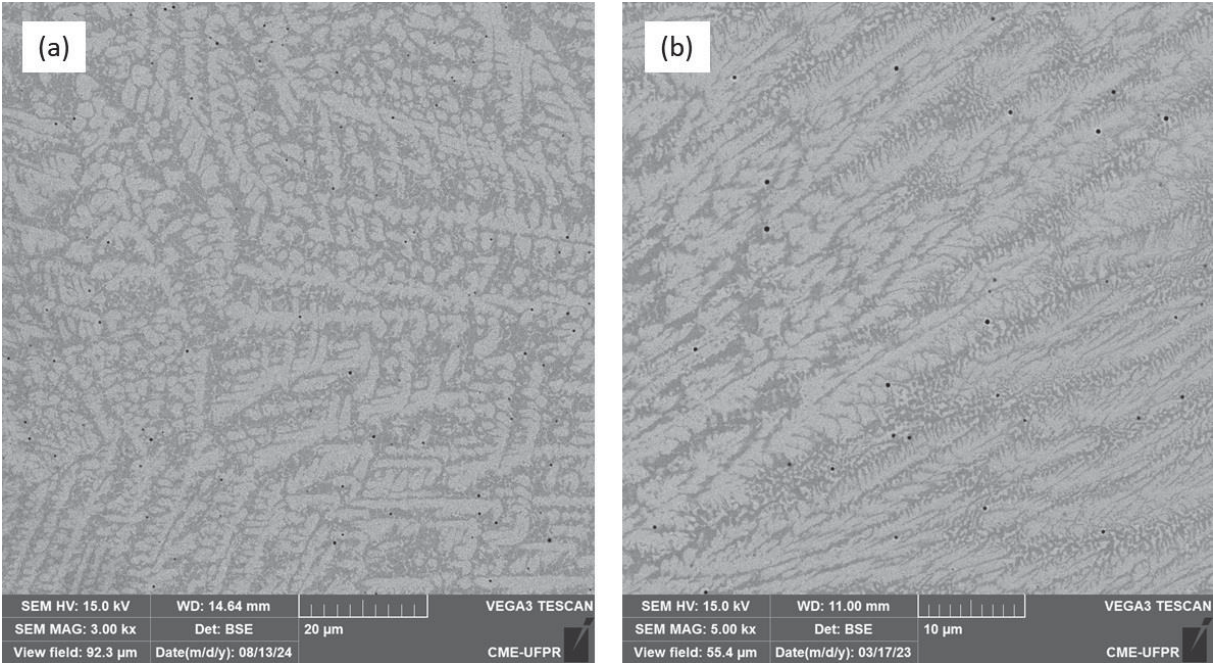
A seguir são apresentadas as imagens obtidas em microscópio eletrônica de Varredura (MEV) com ampliações de 3000 (a) e 5000 vezes (b) para as amostras depositadas com a liga Tribaloy T800® não aditivada. A FIGURA 21 apresenta a microestrutura dos revestimentos depositados para a potência de laser 2,0 kW, composta por uma matriz metálica de solução sólida de cobalto e glóbulos de fase primária intermetálica de Laves. A FIGURA 22 apresenta a microestrutura para a potência de 2,5 kW, onde observam-se dendritas primárias maiores de fase Laves com um constituinte eutético lamelar interdendrítico. Finalmente, a FIGURA 23 apresenta o revestimento com potência de 3,0 kW, na qual identifica-se um constituinte totalmente eutético lamelar. O constituinte eutético lamelar é composto por lamelas finas e intercaladas de solução sólida de cobalto e fase secundária de Laves. A microestrutura é extremamente refinada, o que dificulta especialmente a observação da estrutura lamelar eutética portanto, para esta amostra, foi obtida uma imagem com uma ampliação de 20 mil vezes a fim de se observar a microestrutura (FIGURA 24).

FIGURA 21 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA A POTÊNCIA DE LASER 2,0 kW



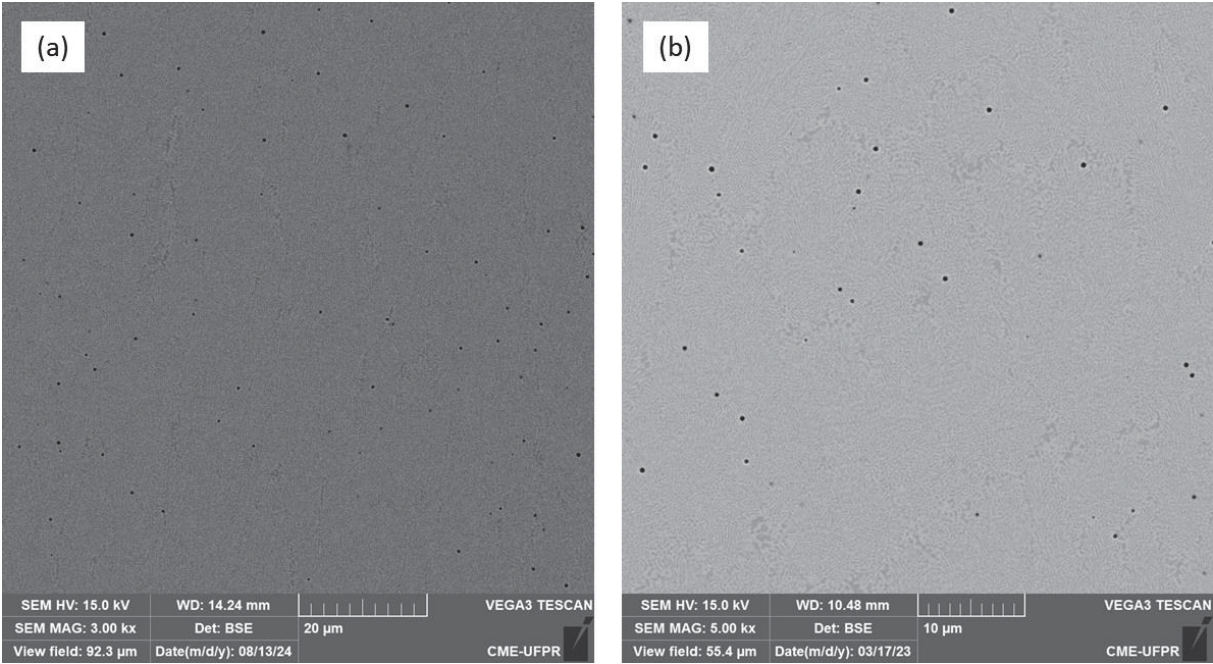
FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 22 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA A POTÊNCIA DE LASER 2,5 kW



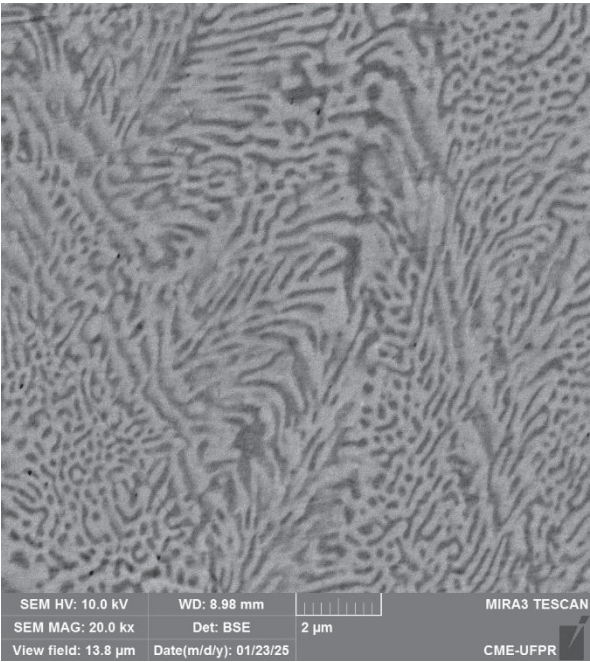
FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 23 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA A POTÊNCIA DE LASER 3,0 kW



FONTE: O Autor (2024).

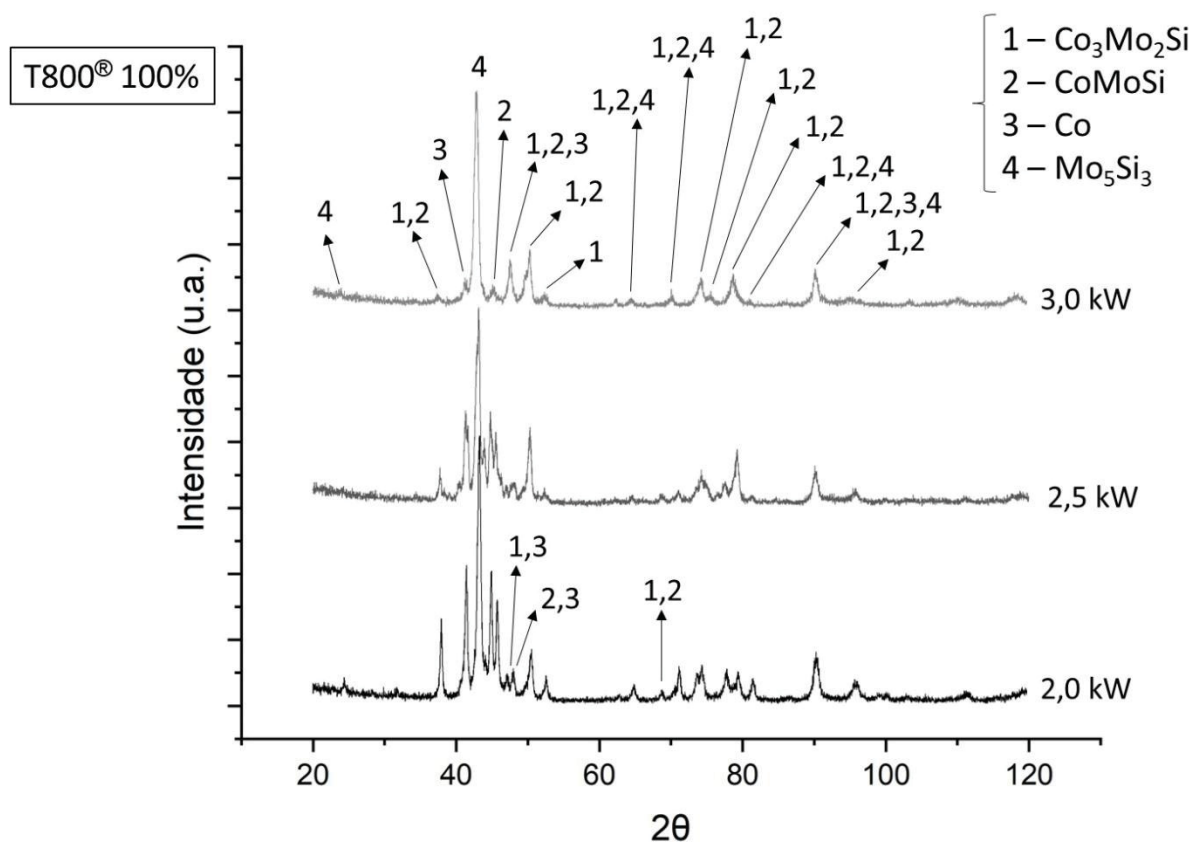
FIGURA 24 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA A POTÊNCIA DE LASER 3,0 kW – COM AMPLIAÇÃO NOMINAL DE 20 MIL VEZES



FONTE: O Autor (2024).

Os padrões de difração de raios X obtidos para as amostras depositadas com as diferentes potências de Laser revelaram principalmente a presença das seguintes fases: solução sólida em cobalto (Co(SS) [CFC]), fase intermetálica de Laves (CoMoSi e $\text{Co}_3\text{Mo}_2\text{Si}$) já descritas por Liu et al. (2005) para ligas Tribaloy, conforme apresenta a FIGURA 25.

FIGURA 25 – ANÁLISES POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS

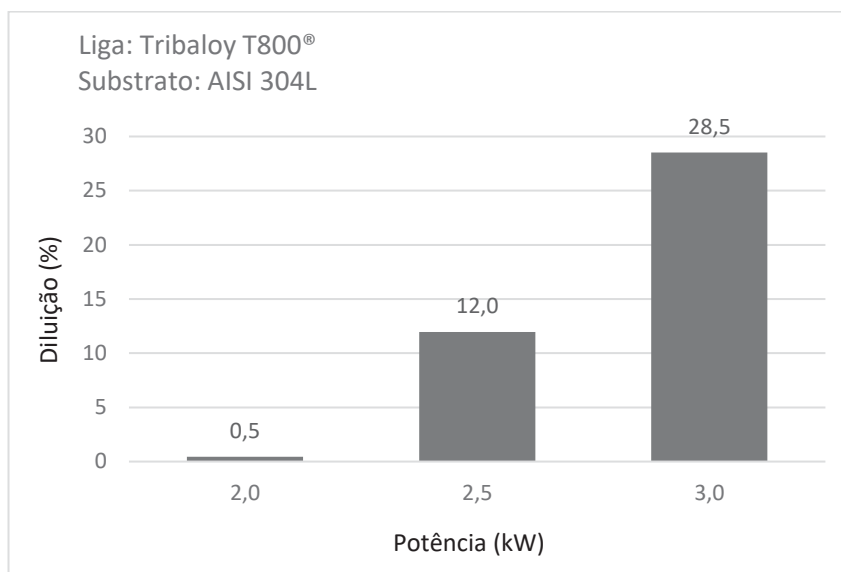


FONTE: O Autor (2024).

4.1.3 Análise da Diluição

A diluição do revestimento da liga Tribaloy T800® não aditivada com o substrato de aço AISI 304L aumentou com o incremento da potência do Laser, conforme observado nas imagens da macrografia e cálculos realizados. Os valores medidos foram lineares, variando de 0,5 % a 28,5 % pelo método de Toyserkani, conforme mostra a FIGURA 26.

FIGURA 26 – DILUIÇÃO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER



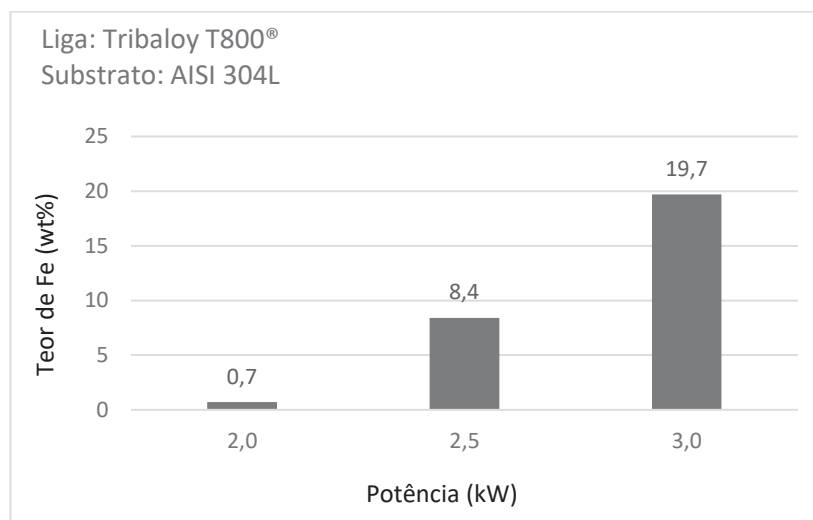
FONTE: O Autor (2024).

4.1.4 Análise Química Semiquantitativa por EDS

A variação do teor de elementos de liga foi avaliada por meio de análises por EDS. O incremento da potência de laser alterou os teores dos principais elementos de liga (Mo, Cr e Si). Conforme mencionado por Liu et al. (2005), o cromo é usado para aumentar a resistência à corrosão e fortalecer a solução sólida porque aumenta a probabilidade de transformar o cobalto CFC em alta temperatura para HC à temperatura ambiente. Já o molibdênio é usado para conferir resistência ao desgaste formando a fase Laves, além de fortalecer a solução sólida, por favorecer a retenção de cobalto CFC à temperatura ambiente.

O teor de ferro foi utilizado para determinar a diluição pelo método de Toyserkani no item 4.1.3 deste trabalho. Porém, a análise do percentual de ferro apresentada na FIGURA 27 auxilia a compreensão do efeito da diluição. Considerando que o substrato utilizado é uma liga ferrosa, pode-se dizer que, à medida que a diluição aumenta, o teor de ferro também aumenta, causando uma redução proporcional do percentual dos principais elementos da liga (Rivero, 2019). Observa-se que, com o incremento da potência do laser, houve um aumento no teor de ferro, consequentemente, também na diluição.

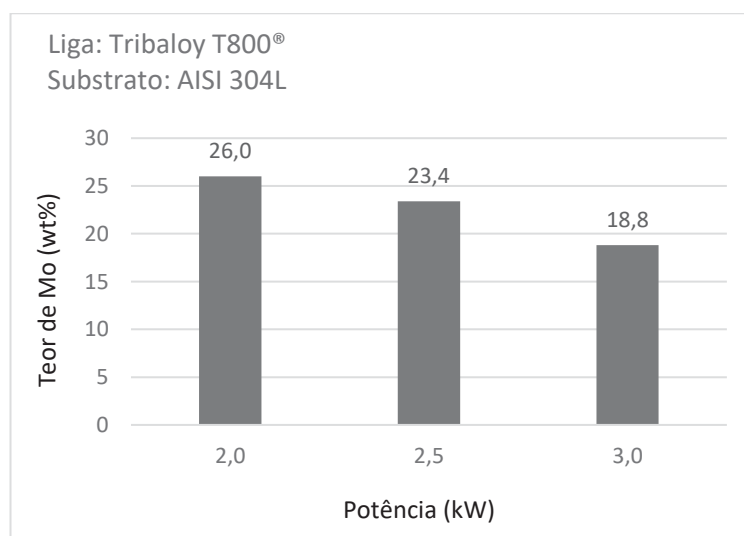
FIGURA 27 – TEOR DE FERRO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER



FONTE: O Autor (2024).

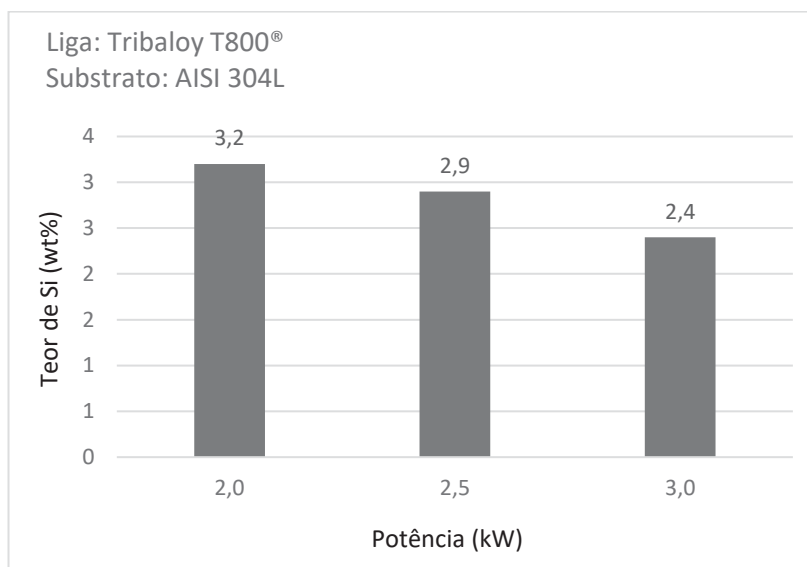
Conforme apresentado na FIGURA 28, houve uma redução do teor de molibdênio e silício para maior potência de laser. Este resultado está de acordo com estudos realizados anteriormente (Rivero, 2019, Pizzatto, 2020) que apontaram que uma maior diluição promove a redução no teor dos elementos da liga de deposição. Portanto, o presente trabalho mostrou tendência similar para o efeito da maior diluição, o que será explorado mais à frente nas discussões da resistência ao risco e da dureza.

FIGURA 28 – TEOR DE MOLIBDÊNIO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER



FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 30 – TEOR DE SILÍCIO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER



FONTE: O Autor (2024).

Finalmente, para a menor potência avaliada (2,0 kW), a composição química da liga Tribaloy T800® foi mantida próxima do material de alimentação original. As taxas de solidificação extremamente elevadas promoveram a formação de pequenos núcleos da fase primária de Laves, com morfologia refinada e globular. O aumento na potência do laser para 2,5 kW levou a taxas de solidificação ligeiramente mais baixas, por sua vez, favorecendo o crescimento dos dendritas da fase primária de Laves e a formação do constituinte eutético lamelar interdendrítico. Assim, foram observados dendritos primários maiores rodeados por estruturas eutéticas lamelares. Já o aumento adicional na potência do laser para 3,0 kW foi responsável por taxas de solidificação ainda mais baixas que, juntamente com a maior diluição, levaram à modificação da composição química da liga, suprimindo a formação da fase primária de Laves e resultando em uma microestrutura eutética lamelar completa.

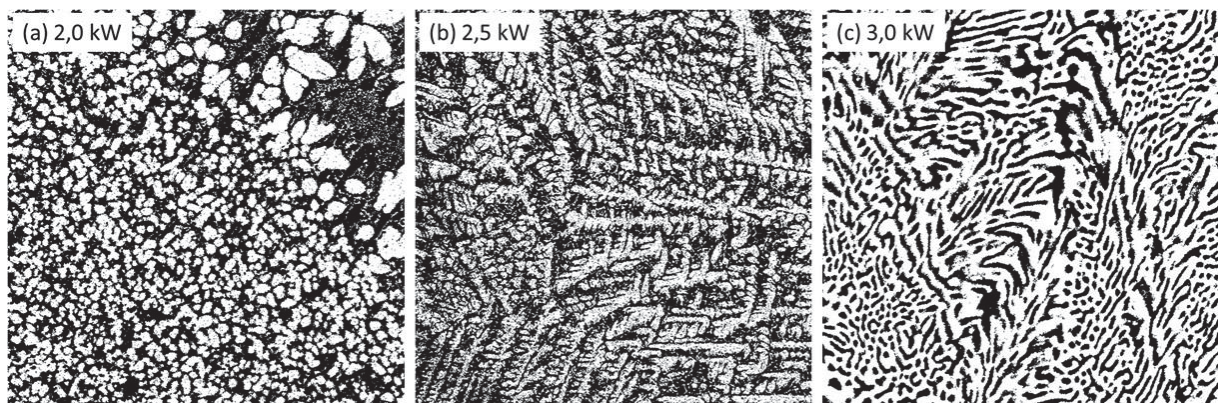
4.1.5 Fração de Fase Laves

Nas superligas de cobalto, a fase Laves atua como fase endurecedora. Estas fases são topologicamente compactas e formadas pelos elementos Co-Mo-Si, que conferem à liga excelente desempenho em ambientes que envolvem desgaste e corrosão ao mesmo tempo (Tobar et al., 2008). Na família das Triballoys, dois

mecanismos atuam no endurecimento da liga: 1) soluções sólidas em cobalto e 2) fração de intermetálicos de Laves (Silva, 2019).

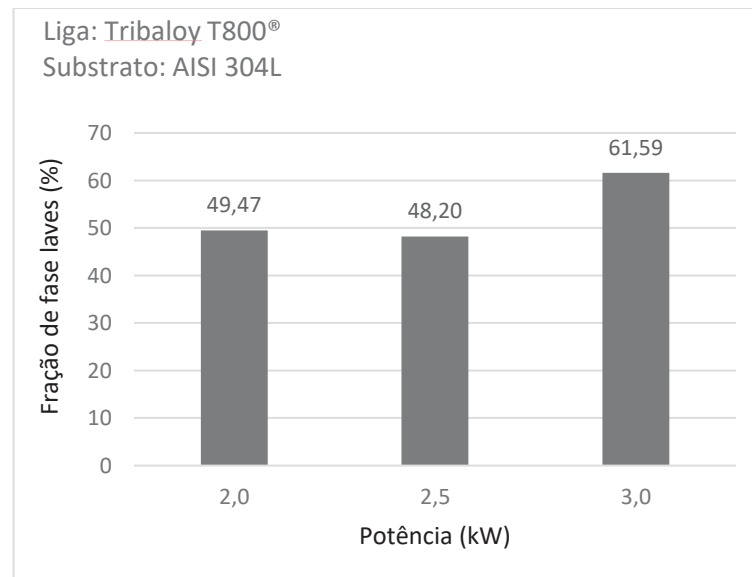
A FIGURA 31 mostra imagens típicas do tratamento de imagem utilizado para diferenciar a fase Laves e a fase Co-SS, tornando a fase Laves branca para as microestruturas da liga T800® sem aditivção. A fração de volume de Laves para cada potência de deposição está indicada na FIGURA 32.

FIGURA 31 – FRAÇÃO DE FASE LAVES DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS



FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 32 – PERCENTUAL DE FRAÇÃO DE FASE LAVES DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS



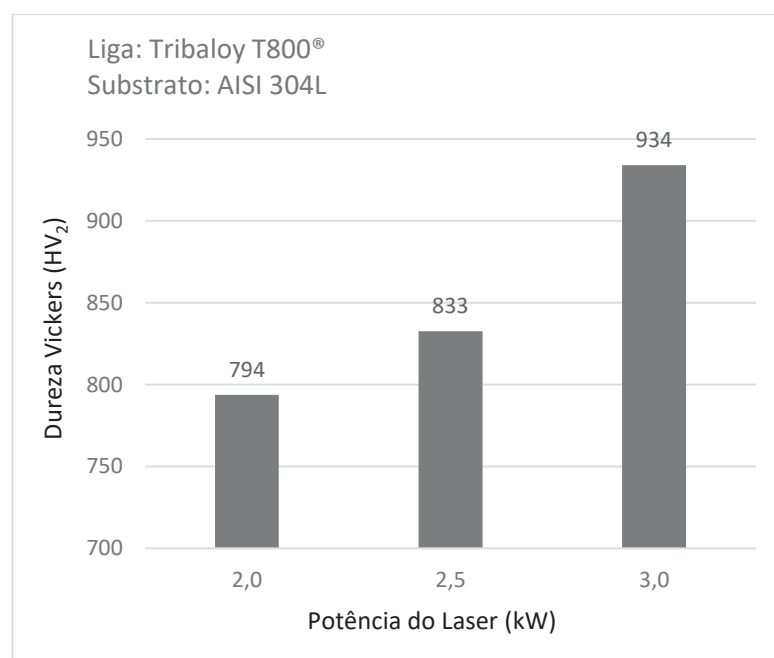
FONTE: O Autor (2024).

Para a amostra depositada com potência de 3,0 kW foi utilizada uma imagem com ampliação superior para que fosse possível observar a microestrutura extremamente refinada. A fração de fase Laves diminuiu com o aumento da potência de laser, em conformidade estudos anteriores, conforme comentado por Silva (2019).

4.1.6 Dureza e Resistência ao Risco

Ficou evidente que a potência de laser influenciou a microestrutura dos revestimentos, portanto, o próximo passo foi avaliar a dureza e a resistência ao risco. (FIGURA 33). Uma elevada dureza foi observada para todas as condições de processamento da liga não aditivada, decorrente da elevada taxa de resfriamento durante a solidificação dos revestimentos. Apesar da alteração da microestrutura com a redução da fração volumétrica total de fase Laves - especialmente da supressão de fase primária de Laves observada para 3,0 kW, a dureza observada foi superior à obtida para potências menores. Isso pode estar relacionado à formação de uma microestrutura lamelar eutética extremamente refinada e uniforme. De qualquer forma, todas as condições avaliadas para a deposição direta da liga Tribaloy T800® apresentaram elevada dureza.

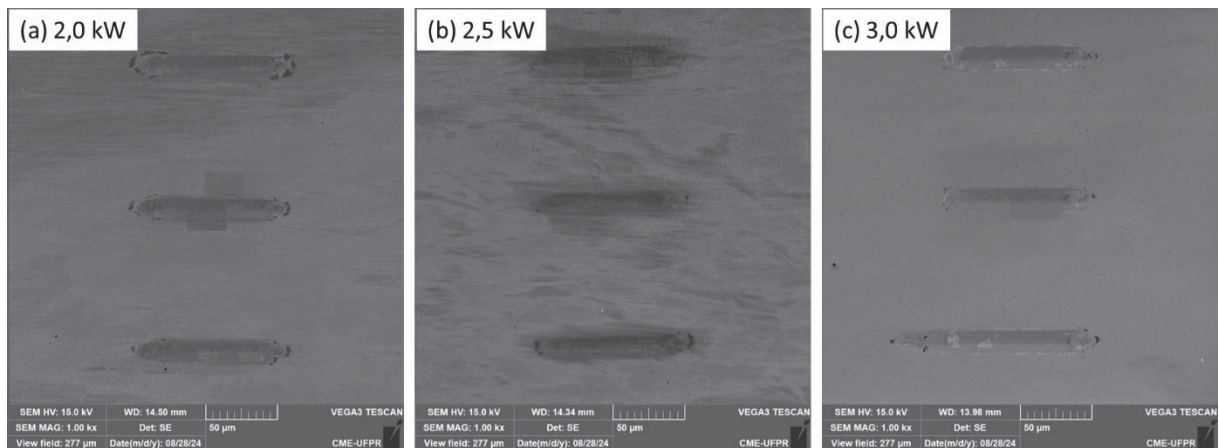
FIGURA 33 – DUREZA DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS



FONTE: O Autor (2024).

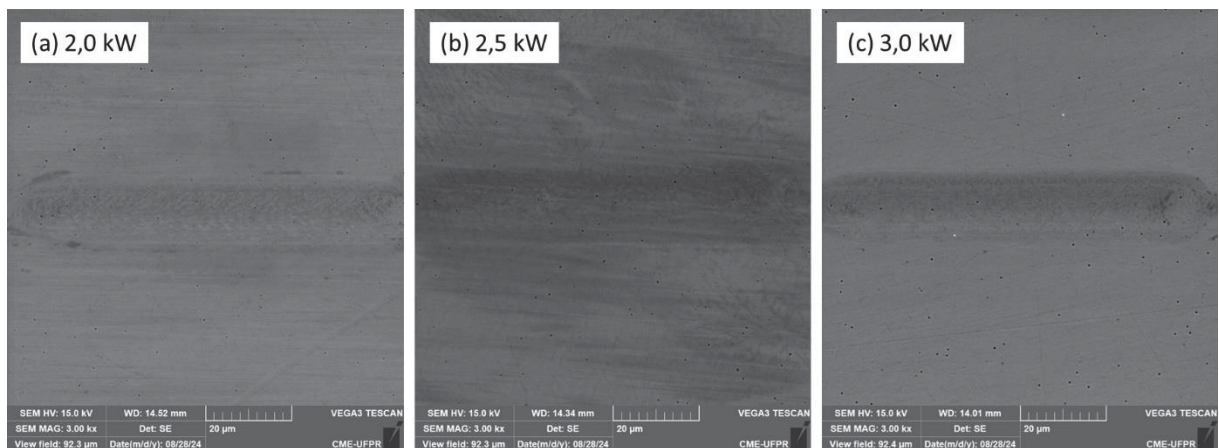
Foram realizados também ensaios de risco e as amostras foram avaliadas por microscópio eletrônico de varredura (FIGURA 34) e (FIGURA 35). Conforme observado através da dureza Vickers, a maior uniformidade da microestrutura da amostra depositada com a maior potência de laser (3,0 kW) também apresentou uma menor largura e menor profundidade do risco.

FIGURA 34 – MEV DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS



FONTE: O Autor (2024).

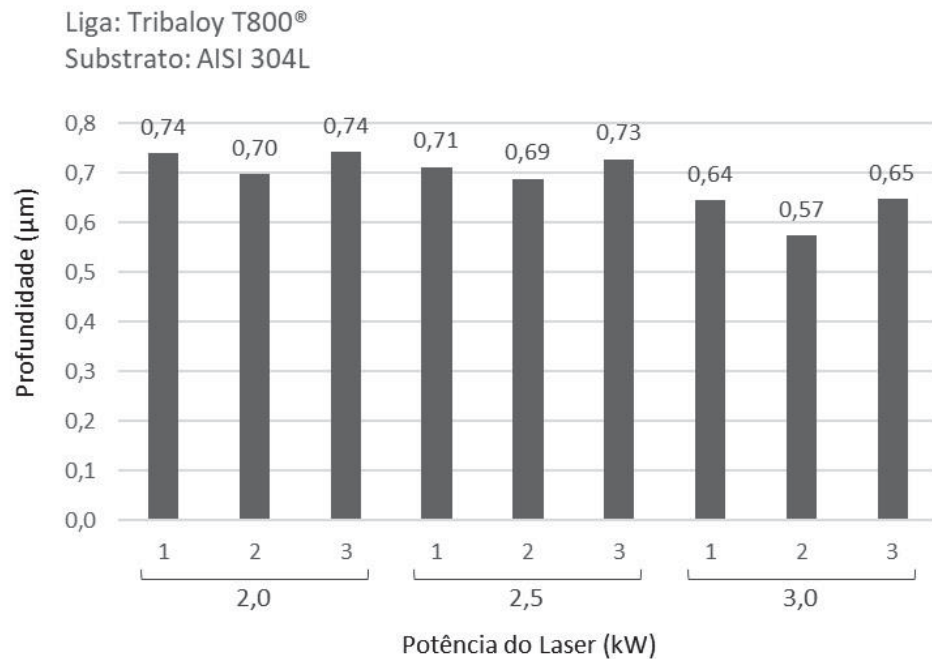
FIGURA 35 – MEV DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS



FONTE: O Autor (2024).

Através das medidas das larguras dos riscos foi possível estimar a profundidade média de cada um dos três riscos feitos em cada amostra, valores apresentados na FIGURA 36.

FIGURA 36 – PROFUNDIDADE DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® NÃO ADITIVADA PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS



FONTE: O Autor (2024).

A fim de tornar a análise mais objetiva, foi calculada a média de profundidade dos riscos para cada amostra, sendo que a amostra depositada com potência de laser de 2,0 kW apresentou média de 0,73 μm de profundidade, a amostra depositada com potência 2,5 kW apresentou média de 0,71 μm , e a amostra depositada com maior potência teve uma média de profundidade dos riscos de 0,62 μm . Por meio dessa análise ficou evidente que no revestimento depositado com a potência de laser de 3,0 kW, a profundidade alcançada pelo indentador é menor, indicando uma dureza maior e, conseqüentemente, uma maior resistência ao riscamento.

4.2 REVESTIMENTOS DE LIGA TRIBALLOY T800® ADITIVADA COM LIGA HASTELLOY C276® – REVESTIMENTOS FUNCIONAIS

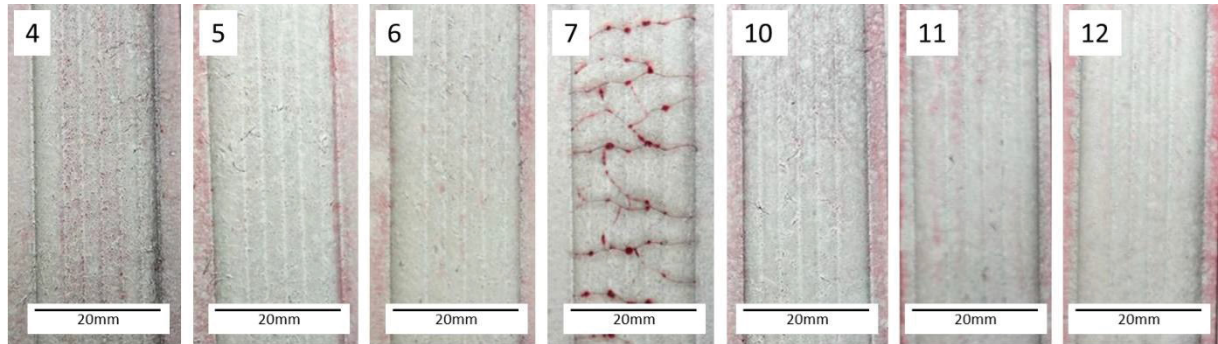
Os resultados para os revestimentos funcionais, ou seja, depositados com as misturas das ligas já mencionadas, são apresentados na seguinte sequência de abordagem:

- I. Aspectos relacionados à integridade dos revestimentos, sendo o aspecto visual ou macroscópico;
- II. Caracterização microestrutural;
- III. Análise do efeito da diluição com o substrato;
- IV. Avaliação dos percentuais dos principais elementos nas amostras depositadas através do método EDS;
- V. Análise da fração de fase Laves;
- VI. Dureza Vickers;
- VII. Ensaios de Risco.

4.2.1 Macroestrutura

A inspeção visual realizada nos revestimentos revelou superfícies lisas dos cordões, com ausência de defeitos como porosidade, mordeduras, respingos ou falta de fusão, mostrando que os parâmetros adotados na deposição foram adequados, seguindo critérios estabelecidos anteriormente (Rivero, 2019). Foram identificadas trincas apenas na amostra 7, sendo um resultado de certa forma esperado para esta composição do revestimento, tendo em vista o percentual de 75% da liga T800® na mistura, o que reforça a tendência observada para as deposições da liga não aditivada. Contudo, as demais amostras não apresentaram trincas, o que revela um resultado bastante interessante sob o ponto de vista do trincamento dos revestimentos da liga T800® (FIGURA 37).

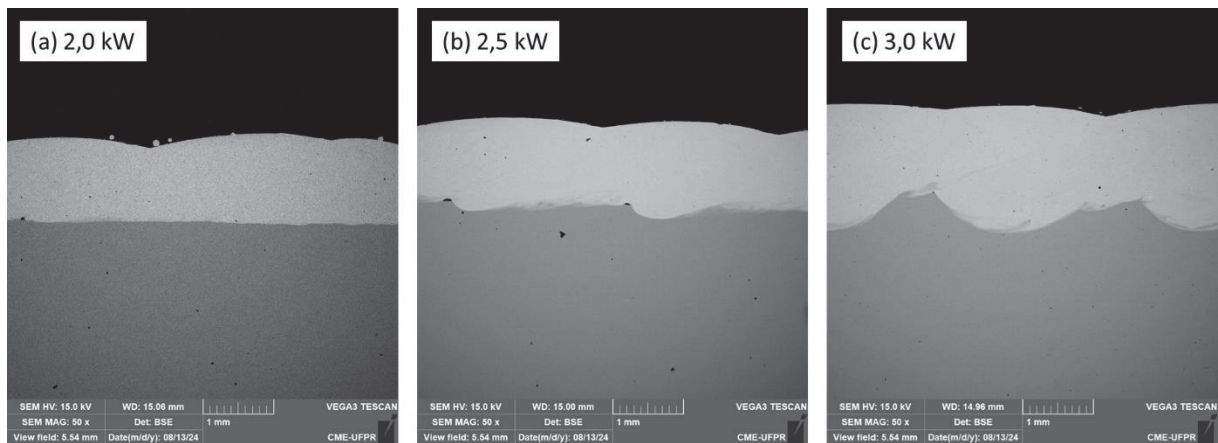
FIGURA 37 – IMAGENS DO ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE NAS AMOSTRAS DE LIGA T800® ADITIVADA COM A LIGA C276®



FONTE: O Autor (2024).

A FIGURA 38 mostra a macrografia das deposições de 50% T800® e 50% C276® nas diferentes potências de Laser. Pode-se observar que com maior aporte de calor, há maior diluição do substrato, aspecto que será desdobrado em detalhe na sequência.

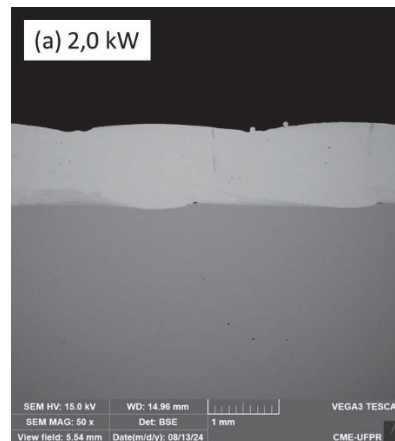
FIGURA 38 – MACROGRAFIA DOS REVESTIMENTOS COM 50% DE T800® E 50% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS



FONTE: O Autor (2024).

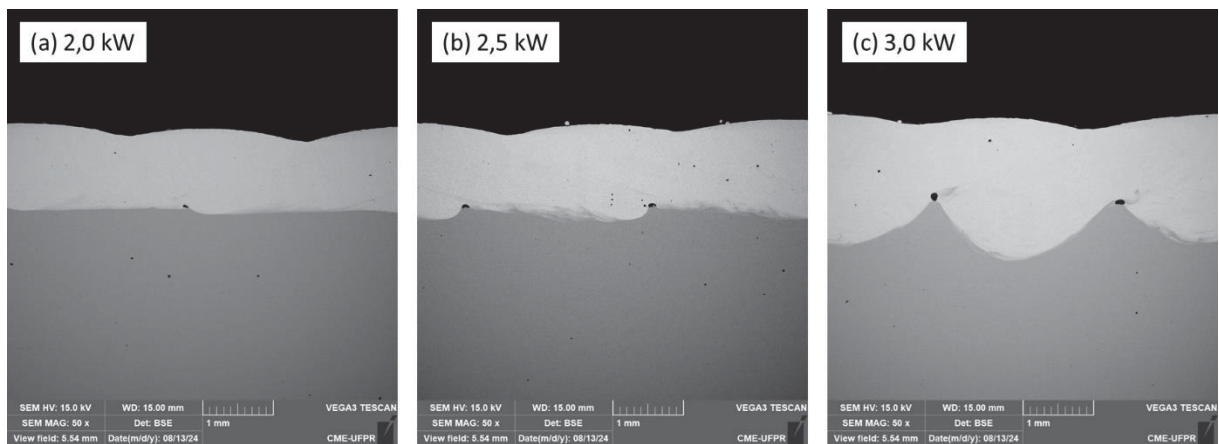
A FIGURA 39 mostra a macrografia da deposição de 75% T800® e 25% C276® com a potência do Laser de 2,0 kW. Conforme já mencionado, tendo em vista que essa condição com 75% de liga T800® apresentou trincamento, as potências de 2,5- e 3,0 kW não foram investigadas. A FIGURA 40 mostra a macrografia das deposições de 25% T800® e 75% C276® nas diferentes potências de Laser.

FIGURA 39 – MACROGRAFIA DO REVESTIMENTO COM 75% DE T800® E 25% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE LASER DE 2,0 kW



FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 40 – MACROGRAFIA DOS REVESTIMENTOS COM 25% DE T800® E 75% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS

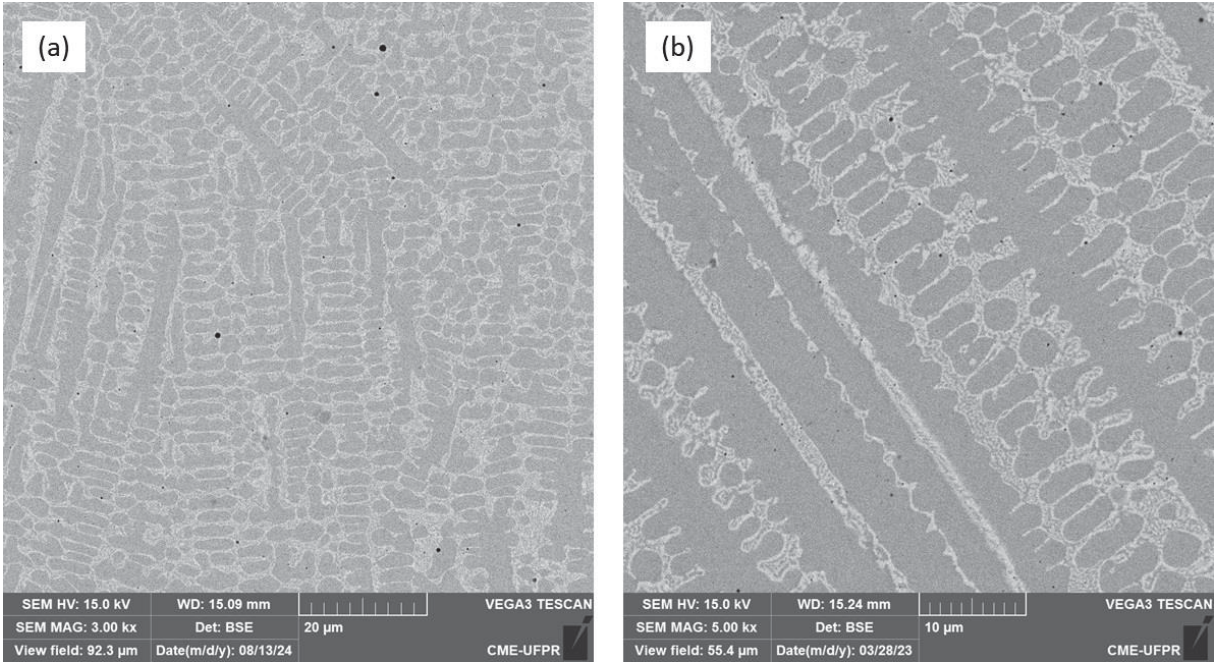


FONTE: O Autor (2024).

4.2.2 Microestrutura e Difração de Raios X

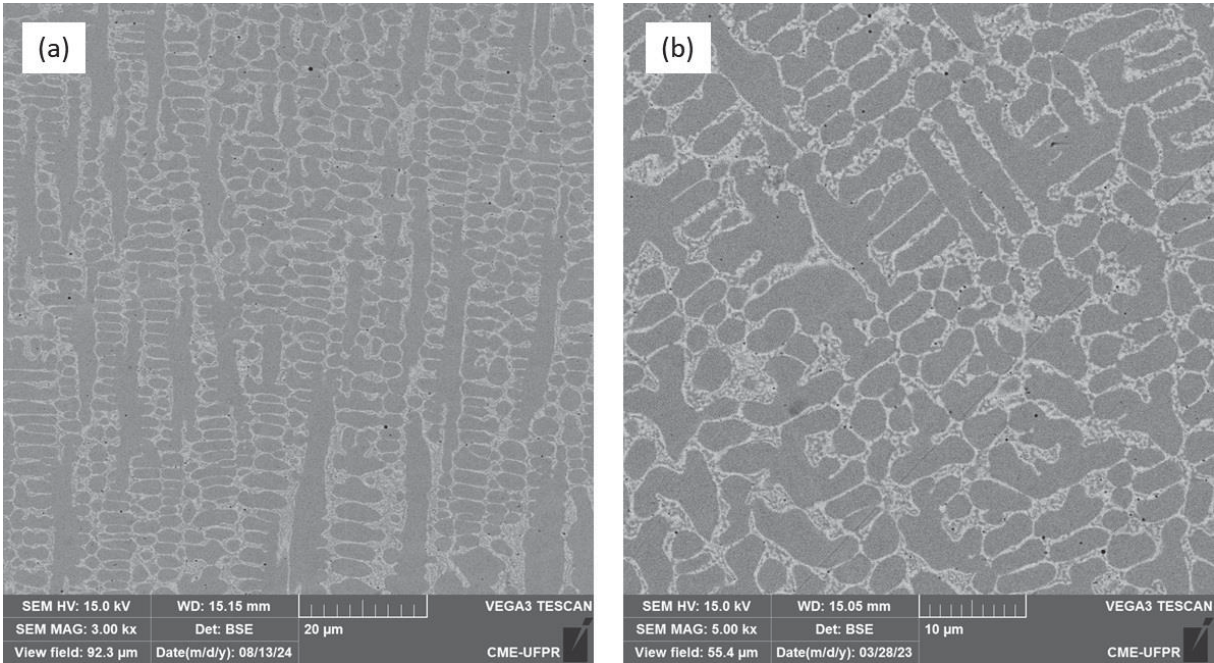
A microestrutura das amostras depositadas com mistura das ligas Tribaloy T800® e Hastelloy C276® (50% : 50%), apresentou uma microestrutura composta por dendritas de solução sólida em cobalto e uma estrutura interdendrítica lamelar eutética, conforme apresentado nas ampliações 3000 (a) e 5000 vezes (b), nas FIGURAS 41, 42 e 43. Conforme descrito por Liu et al. (2005), uma das características das ligas CoCrMoSi é apresentar uma fase de solução sólida em Co e também regiões de eutéticas lamelares compostas por solução sólida de Co e fase secundária de Laves.

FIGURA 41 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS COM 50% DE T800® E 50% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE LASER 2,0 kW



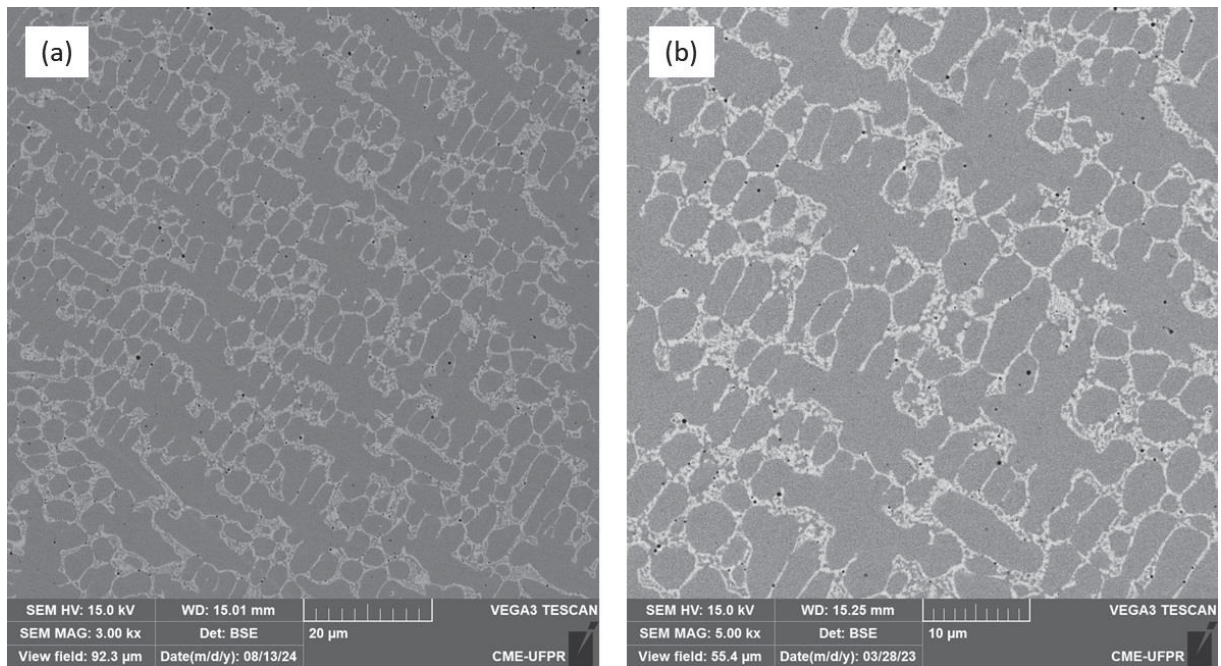
FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 42 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS COM 50% DE T800® E 50% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE LASER 2,5 kW



FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 43 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS COM 50% DE T800® E 50% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE LASER 3,0 kW

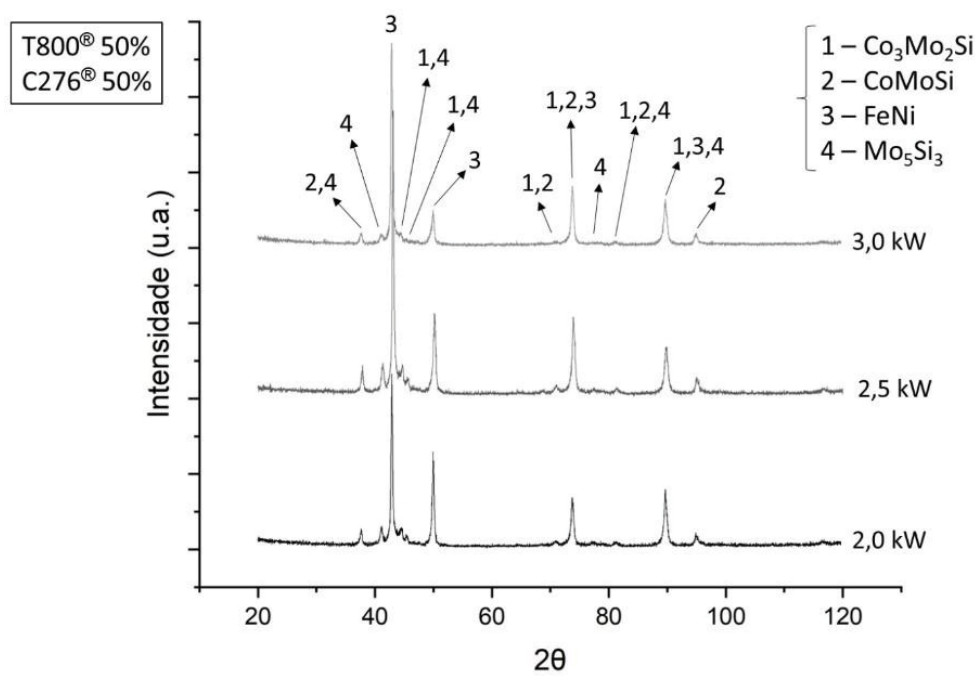


FONTE: O Autor (2024).

Os padrões de difração de raios X revelaram a presença das seguintes fases: solução sólida em cobalto (Co(SS) [CFC]) e fase intermetálica de Laves (CoMoSi e $\text{Co}_3\text{Mo}_2\text{Si}$) (FIGURA 44).

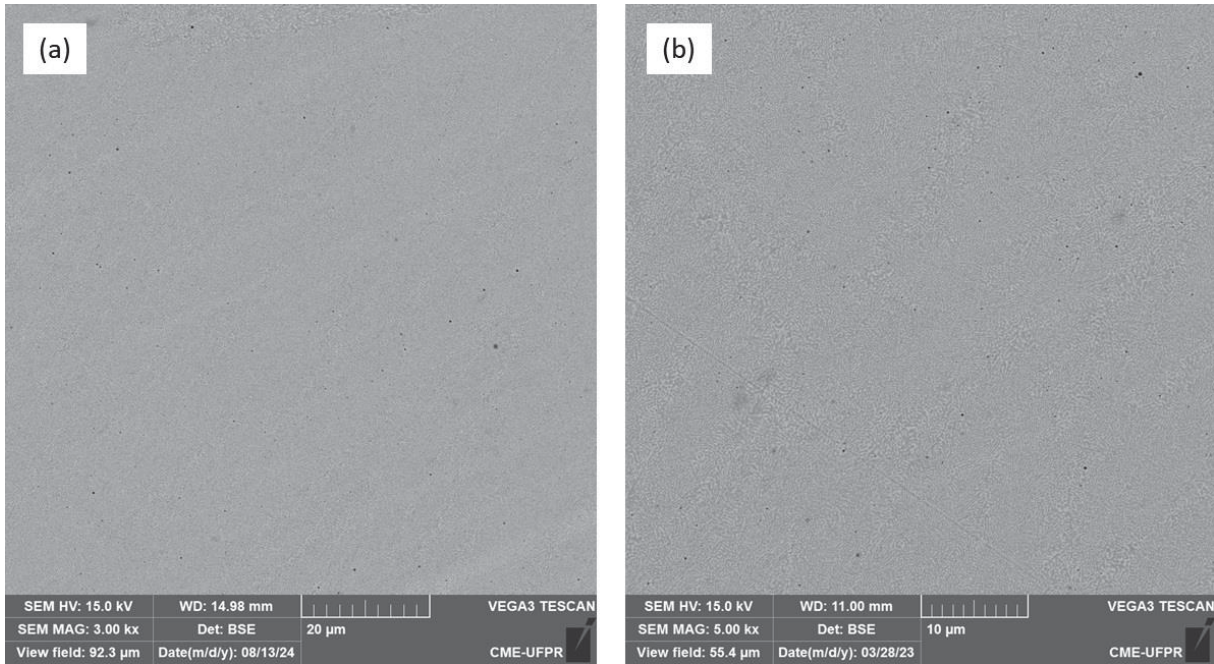
A FIGURA 45 apresenta a microestrutura do revestimento depositado com a mistura das ligas Tribaloy T800® a 75% e Hastelloy C276® a 25%, constituída por 100% de constituinte eutético lamelar, com ampliações 3000 (a) e 5000 vezes (b). Devido a estrutura extremamente refinada deste revestimento, foi necessário obter imagens com ampliações maiores para que fosse possível observar a microestrutura (FIGURA 46). A FIGURA 47 mostra a análise por difração de raios X da amostra com 75% de T800® e 25% de C276®.

FIGURA 44 – PADRÕES DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X DOS REVESTIMENTOS COM 50% DE T800® E 50% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS



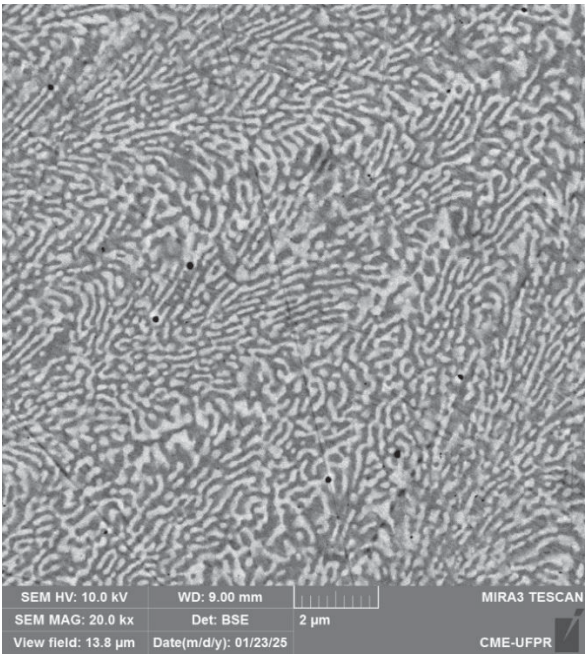
FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 45 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS COM 75% DE T800® E 25% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE 2,0 kW



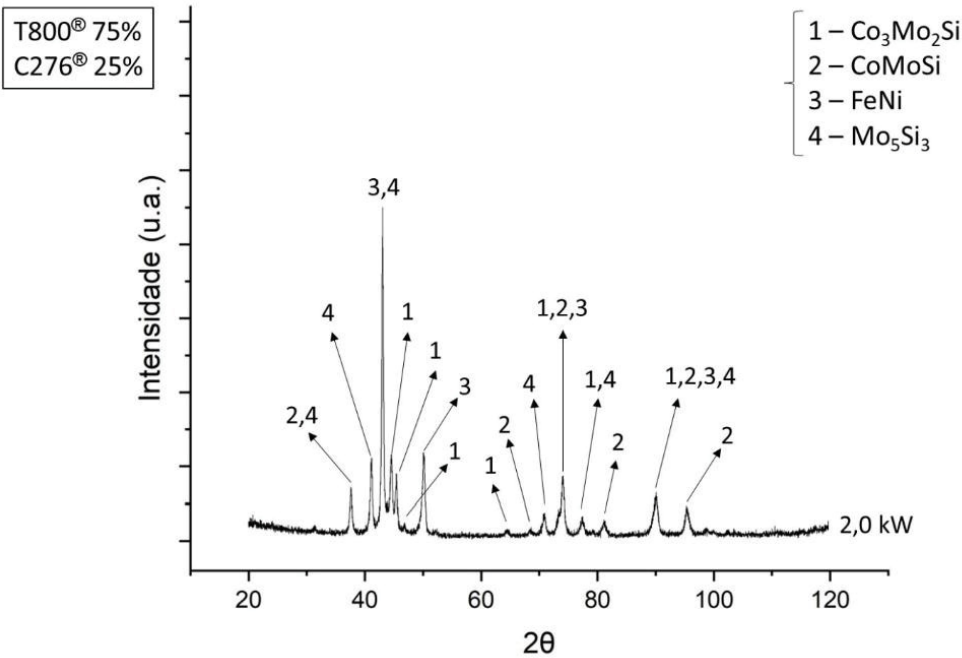
FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 46 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS COM 75% DE T800® E 25% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE 2,0 kW COM AMPLIAÇÃO NOMINAL DE 20 MIL VEZES



FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 47 – PADRÕES DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X DOS REVESTIMENTOS COM 75% DE T800® E 25% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE 2,0 kW

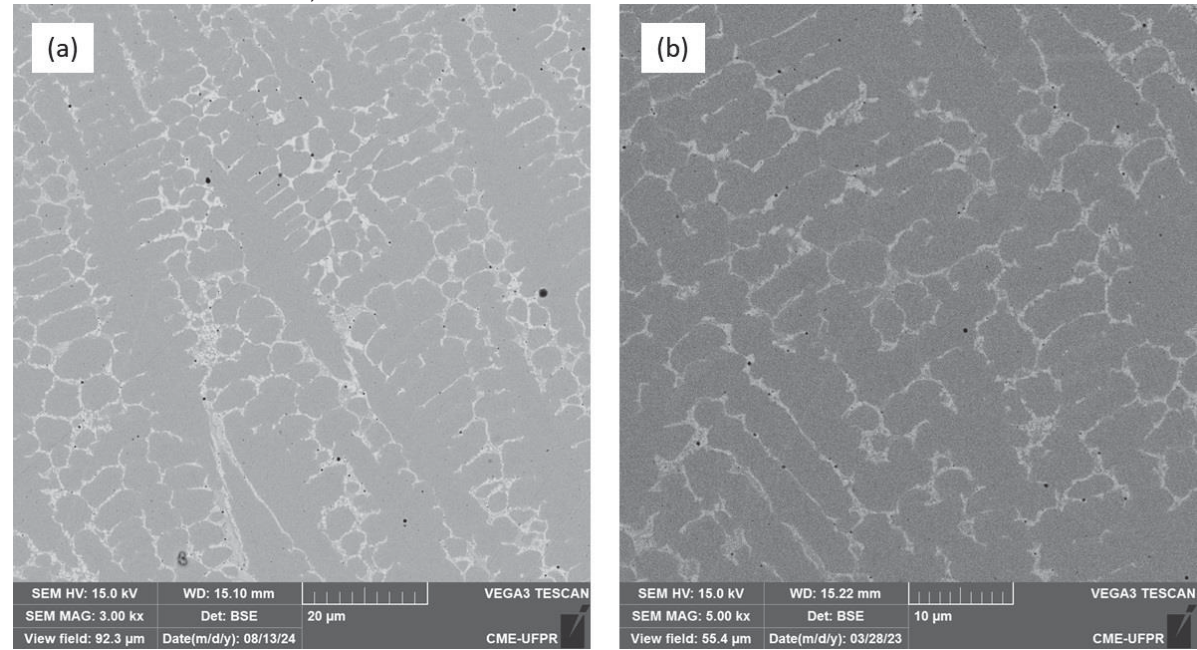


FONTE: O Autor (2024).

As FIGURAS 48, 49 e 50 apresentam a microestrutura dos revestimentos depositados com a mistura das ligas Tribaloy T800® a 25% e Hastelloy C276® a 75%,

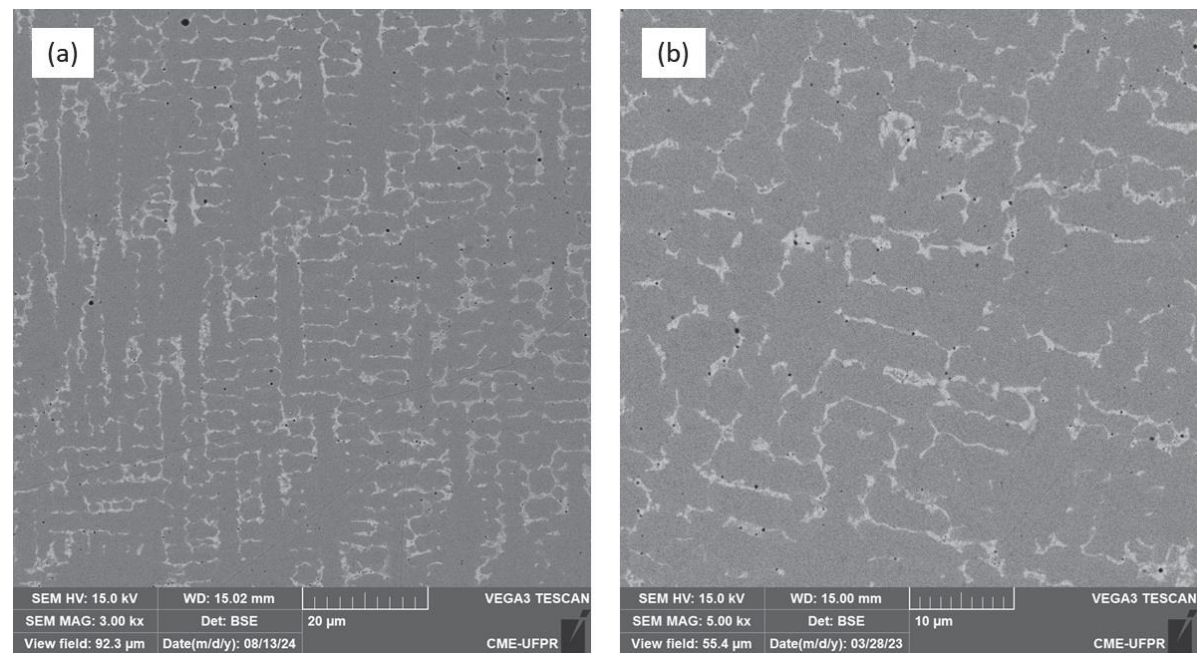
para as potências de laser de 2,0-, 2,5- e 3,0 kW, respectivamente, com ampliações 3000 (a) e 5000 vezes (b). A microestrutura é composta por dendritas de solução sólida em cobalto e fase Laves secundária distribuída interdendriticamente.

FIGURA 48 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS COM 25% DE T800® E 75% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE 2,0 kW



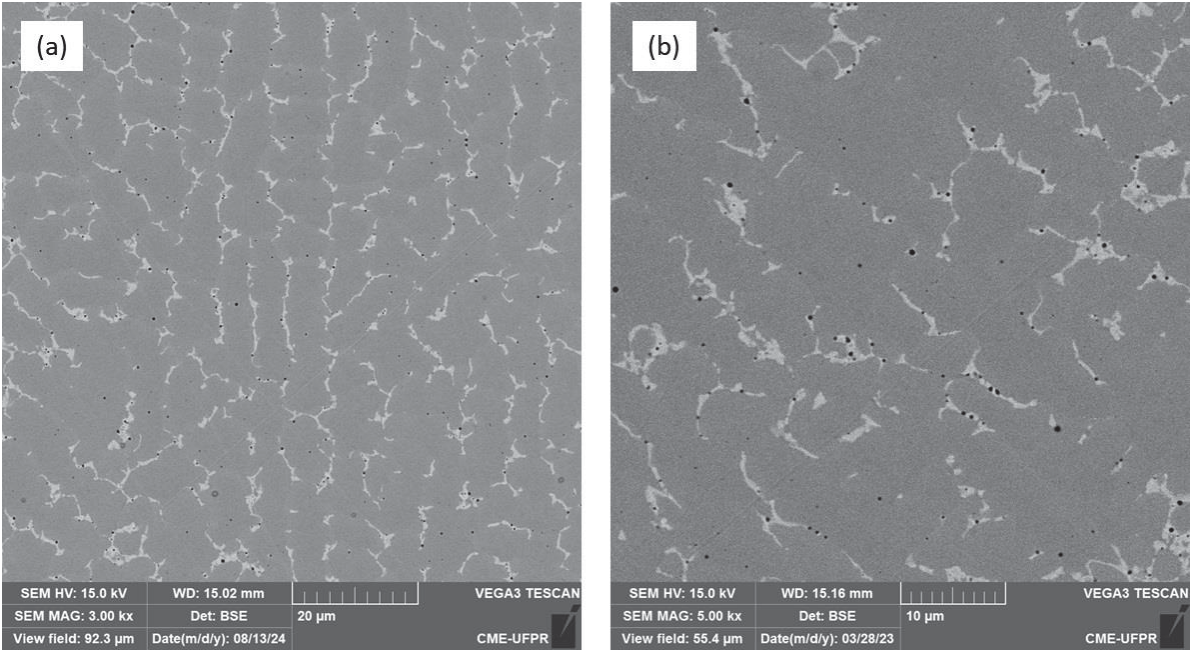
FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 49 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS COM 25% DE T800® E 75% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE 2,5 kW



FONTE: O Autor (2024).

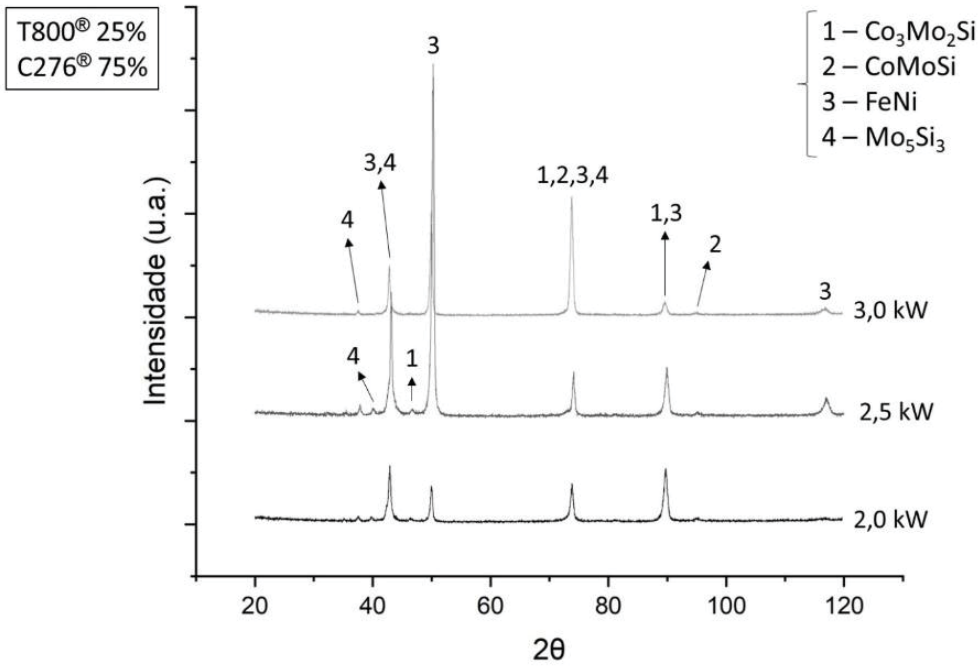
FIGURA 50 – MICROESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS COM 25% DE T800® E 75% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE 3,0 kW



FONTE: O Autor (2024).

A FIGURA 51 mostra as análises por difração de raios X das amostras com 25% de T800® e 75% de C276®.

FIGURA 51 – PADRÕES DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X DOS REVESTIMENTOS COM 25% DE T800® E 75% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS

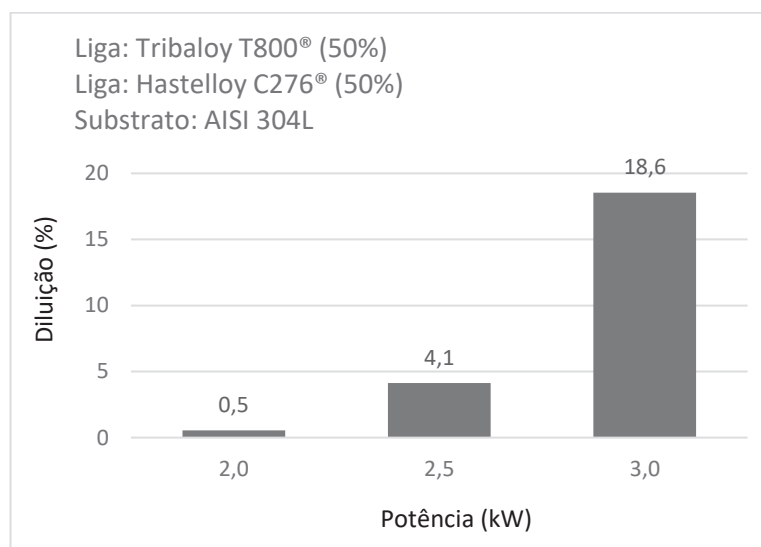


FONTE: O Autor (2024).

4.2.3 Análise da Diluição

A diluição dos revestimentos com a mistura das ligas Tribaloy T800® a 50% e Hastelloy C276® a 50% com o substrato de aço AISI 304L foi calculada pelo método de Toyserkani e está apresentado na FIGURA 52.

FIGURA 52 – DILUIÇÃO DOS REVESTIMENTOS COM 50% DE T800® E 50% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS

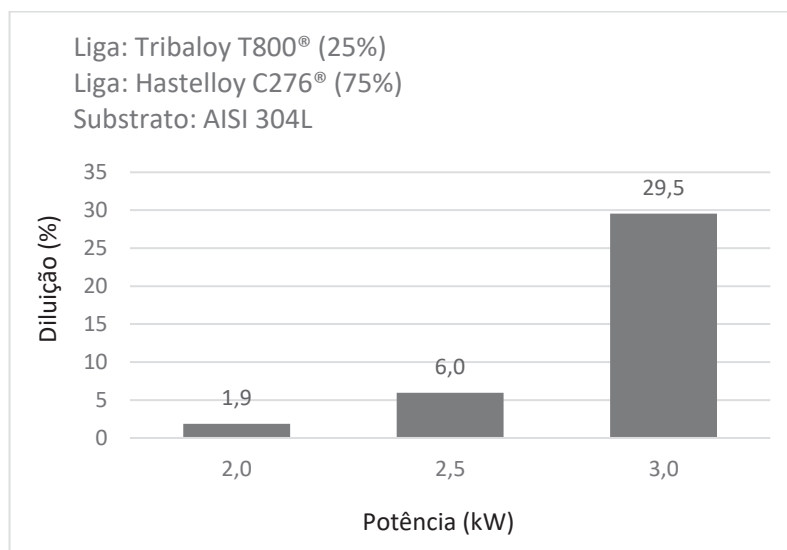


FONTE: O Autor (2024).

A diluição dos revestimentos com a mistura das ligas Tribaloy T800® a 75% e Hastelloy C276® a 25% com o substrato de aço AISI 304L para a potência de laser 2,0 kW, calculada pelo método de Toyserkani, foi de 1,6%. Por se tratar de uma única condição, optou-se por trazer apenas o valor numérico diretamente no texto.

Finalmente, a diluição dos revestimentos com a mistura das ligas Tribaloy T800® a 25% e Hastelloy C276® a 75% com o substrato de aço AISI 304L para as diferentes potências de laser é apresentada na FIGURA 53.

FIGURA 53 – DILUIÇÃO DOS REVESTIMENTOS COM 25% DE T800® E 75% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS



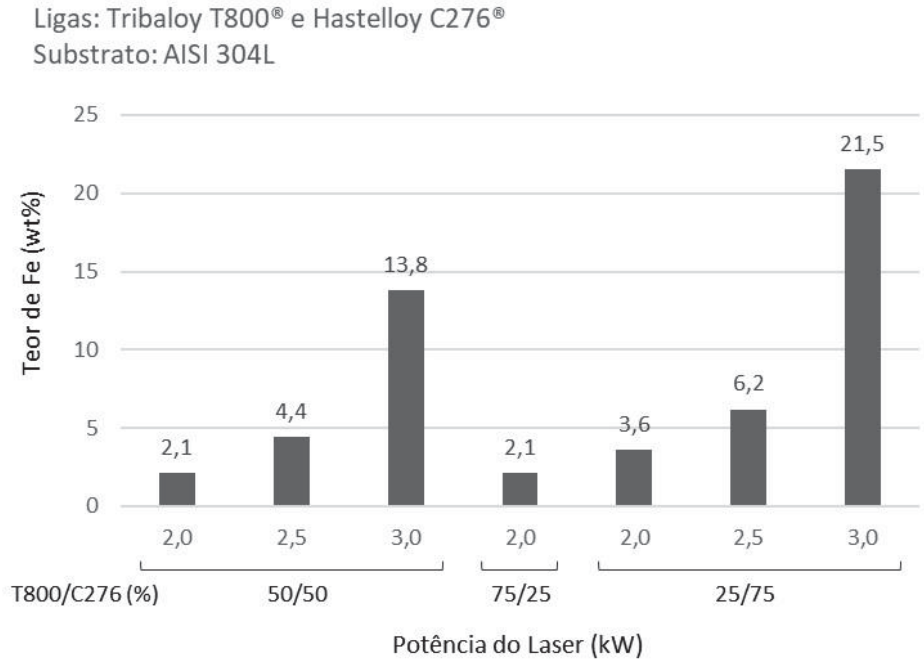
FONTE: O Autor (2024).

Conforme observado, o aumento da diluição está associado à elevação da potência do laser, ou seja, do aporte térmico na deposição, o que já era esperado, pois resultados semelhantes foram obtidos em estudos anteriores (Pizzatto, 2020; Rivero et al., 2020).

4.2.4 Análise Química Semiquantitativa por EDS

A variação do teor de elementos de liga foi avaliada por meio de análises por EDS. O teor de ferro foi utilizado para determinar a diluição pelo método de Toyserkani no item 4.2.3 deste trabalho, no entanto, a análise do percentual de ferro apresentada na FIGURA 54 auxilia a compreensão do efeito da diluição. Observa-se que com o incremento da potência do laser, houve um aumento no teor de ferro, acompanhando a diluição para as diferentes misturas das ligas depositadas.

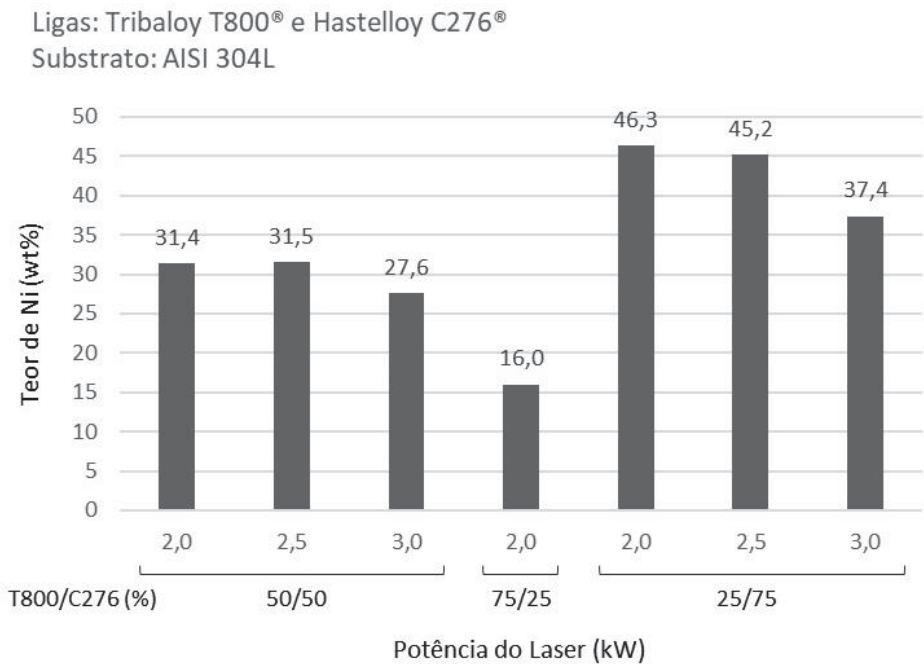
FIGURA 54 – TEOR DE FERRO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® ADITIVADA COM A LIGA HASTELLOY C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER



FONTE: O Autor (2024).

A FIGURA 55 apresenta o teor de níquel nas amostras depositadas com as diferentes potências de laser avaliadas.

FIGURA 55 – TEOR DE NÍQUEL DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® ADITIVADA COM A LIGA HASTELLOY C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER



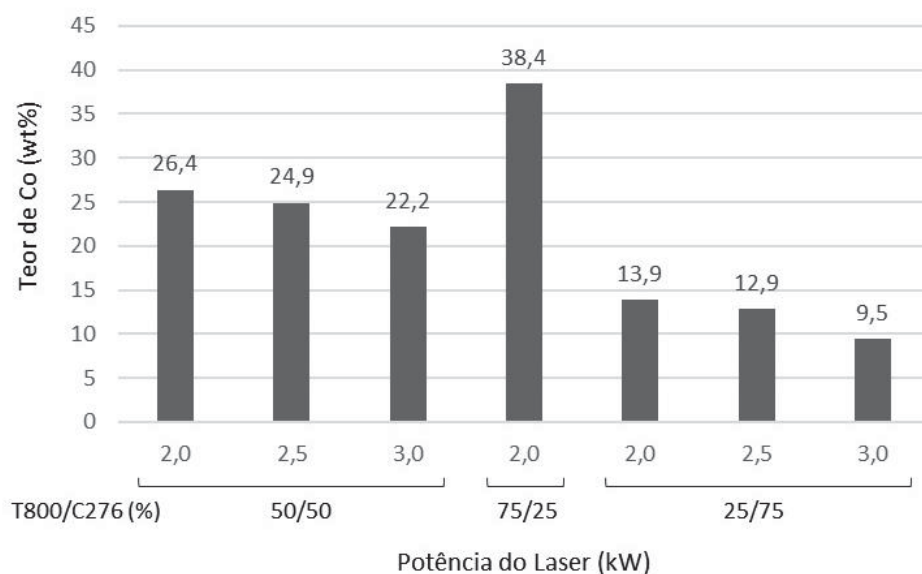
FONTE: O Autor (2024).

Pode-se notar que as amostras com maior porcentagem da liga Hastelloy C276® apresentaram maior teor de níquel, devido a esta liga apresentar grande concentração deste elemento, chegando próximo de 60%. Já a amostra que apresenta menor porcentagem da liga C276® foi a que apresentou menor teor de níquel.

A FIGURA 56 apresenta o teor de cobalto nas amostras depositadas com as diferentes potências de laser avaliadas. As amostras com maior porcentagem da liga Tribaloy T800® apresentaram maior teor de cobalto, isto era esperado visto que esta liga apresenta cerca de 50% deste elemento.

FIGURA 56 – TEOR DE COBALTO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALOY T800® ADITIVADA COM A LIGA HASTELLOYS C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER

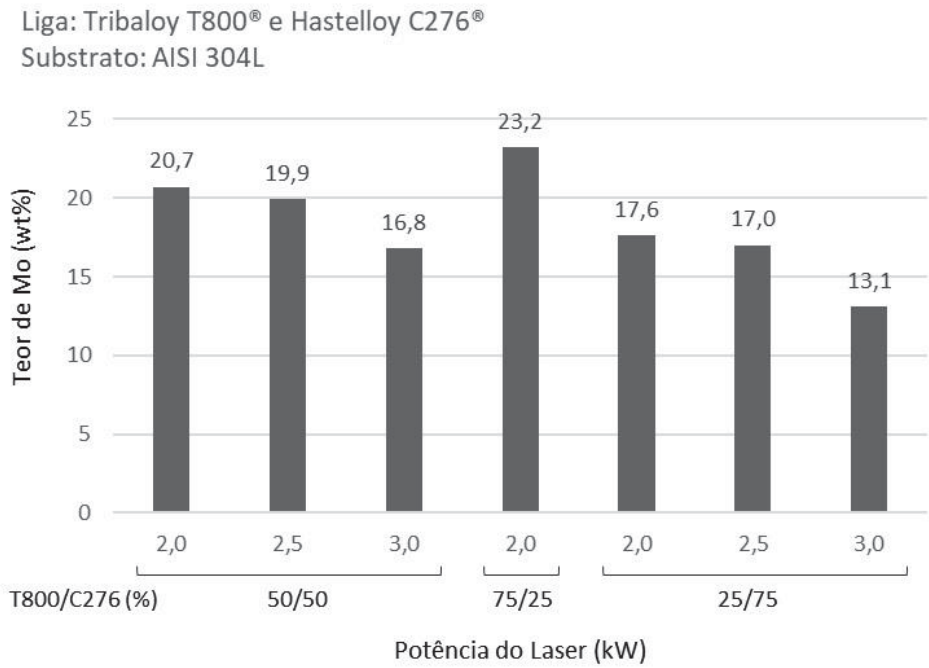
Ligas: Tribaloy T800® e Hastelloy C276®
Substrato: AISI 304L



FONTE: O Autor (2024).

A FIGURA 57 mostra que houve uma redução do teor de molibdênio à medida que a potência do laser aumentou, considerando amostras com o mesmo percentual das ligas. Conforme comentado anteriormente, a redução no teor de molibdênio potencialmente promove a diminuição da fração de fases Laves e do endurecimento por soluções sólidas e, portanto, reduz a resistência ao risco e a dureza dos revestimentos.

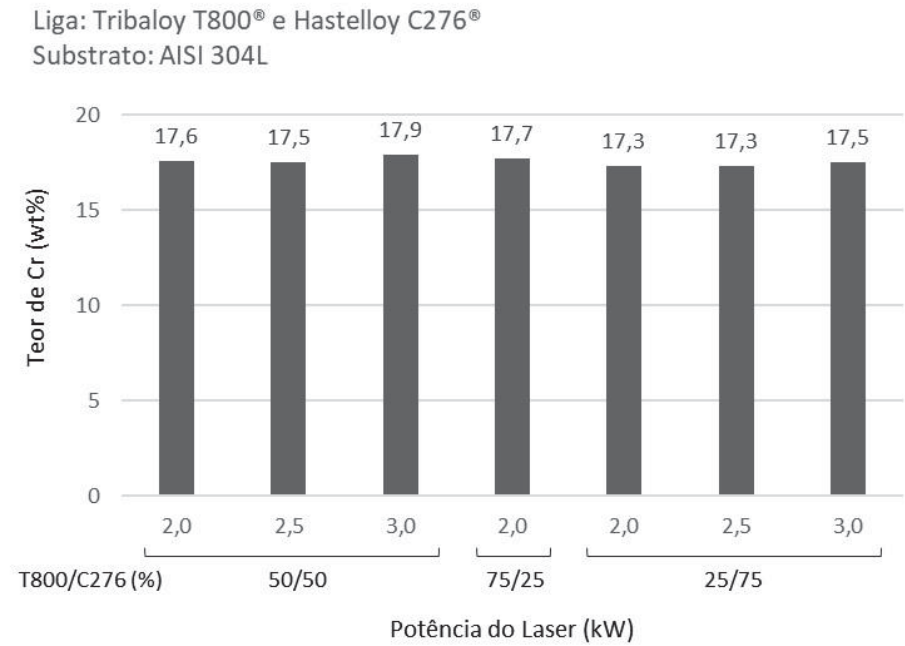
FIGURA 57 – TEOR DE MOLIBDÊNIO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALOY T800® ADITIVADA COM A LIGA HASTELLOY C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER



FONTE: O Autor (2024).

Com relação ao teor de cromo, a variação não foi significativa entre todas as amostras avaliadas (FIGURA 58).

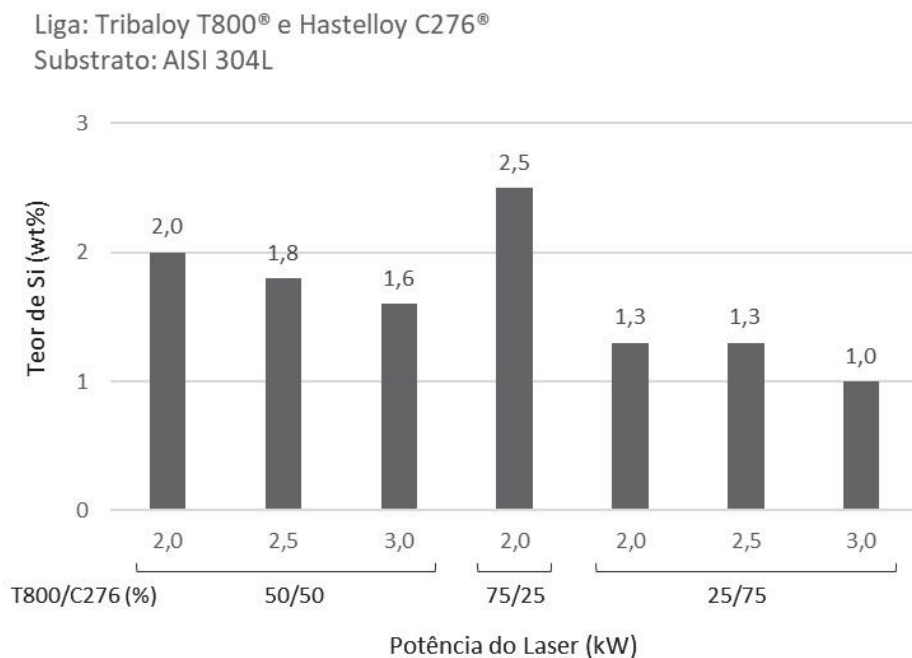
FIGURA 58 – TEOR DE CROMO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALOY T800® ADITIVADA COM A LIGA HASTELLOY C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER



FONTE: O Autor (2024).

Por fim, foi avaliado o teor de silício nos revestimentos depositados, conforme apresentado na FIGURA 59, na qual é possível observar uma tendência à redução desse elemento com o incremento da potência do laser. É importante mencionar que a fração de fase Laves é diretamente dependente do teor final de molibdênio e de silício no revestimento. Silva (2019) já verificou essa tendência quando mencionou em seus estudos que com o aumento do aporte térmico houve redução do teor de elementos de liga e na fração de fase intermetálica de Laves.

FIGURA 59 – TEOR DE SILÍCIO DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® ADITIVADA COM A LIGA HASTELLOY C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER



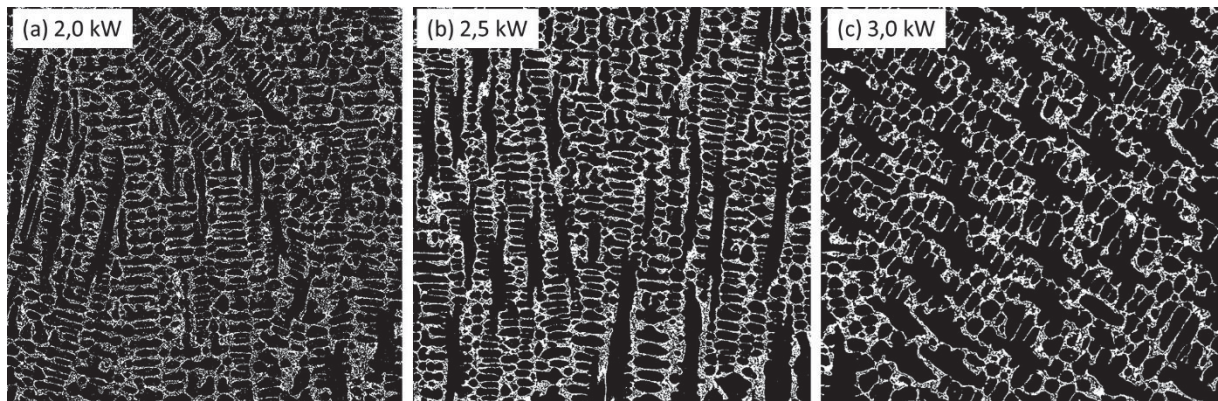
FONTE: O Autor (2024).

4.2.5 Fração de Fase Laves

Todas as amostras foram tratadas e analisadas com relação ao o volume de fração de fase Laves (fase branca nas imagens), FIGURAS 60, 61 e 62. Os valores percentuais para cada amostra são apresentados na FIGURA 61. É possível notar uma tendência à redução da fração de fase Laves à medida que aumenta a potência do laser, aspecto que já foi observado em estudos similares envolvendo as ligas Triballoy (Silva, 2019).

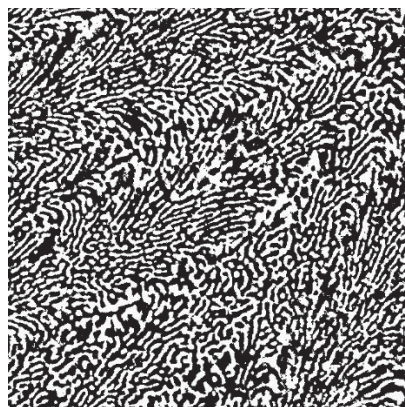
Pode-se observar a redução significativa da fração de fase Laves nas amostras aditivadas com liga Hastelloy C276®, conforme observado nas FIGURAS 60 à 63, o que levou à eliminação do trincamento dos revestimentos. Já o revestimento com a maior porcentagem da liga T800® (75% T800® + 25% C276®) apresentou uma fração de fases Laves superior aos demais. É importante notar ainda que esta condição apresentou uma microestrutura extremamente refinada (lamelar de Co-SS + Laves), de forma que, para a quantificação das fases Laves, foi necessário o uso de imagens em maior ampliação.

FIGURA 60 – FRAÇÃO DE FASE LAVES DOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 50% DE T800® E 50% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS



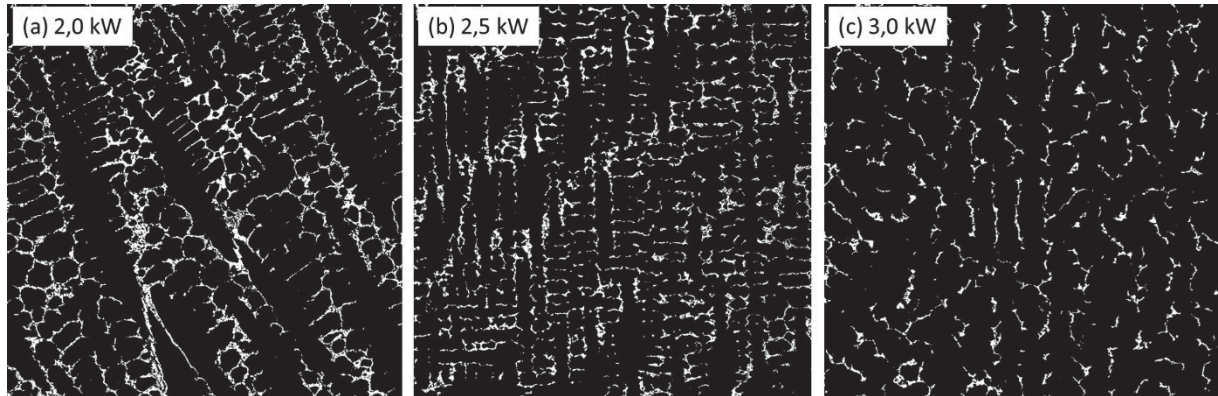
FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 61 – FRAÇÃO DE FASE LAVES DOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 75% DE T800® E 25% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE 2,0 kW



FONTE: O Autor (2024).

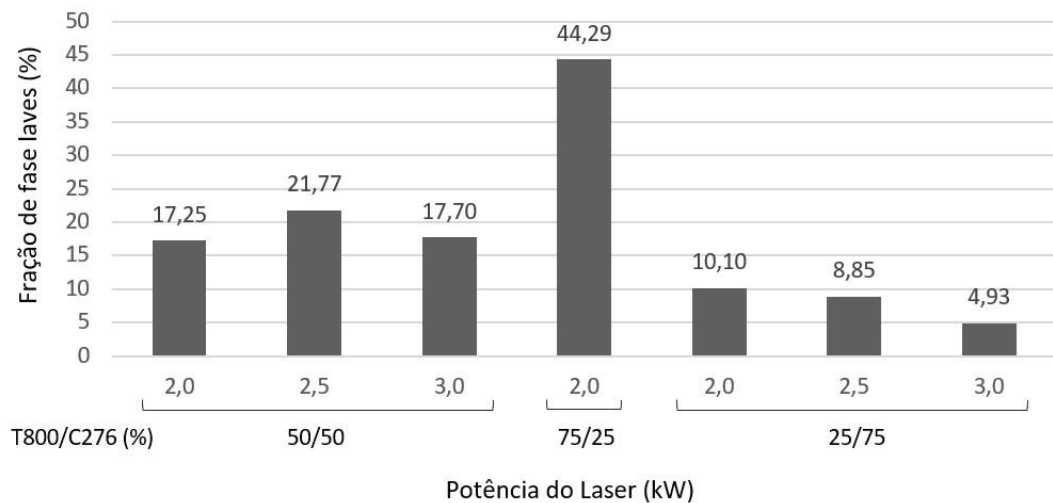
FIGURA 62 – FRAÇÃO DE FASE LAVES DOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 25% DE T800® E 75% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS



FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 63 – PORCENTAGEM DE FRAÇÃO DE FASE LAVES DOS REVESTIMENTOS DA LIGA T800® ADITIVADA COM A LIGA C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS

Liga: Tribaloy T800® e Hastelloy C276®
Substrato: AISI 304L



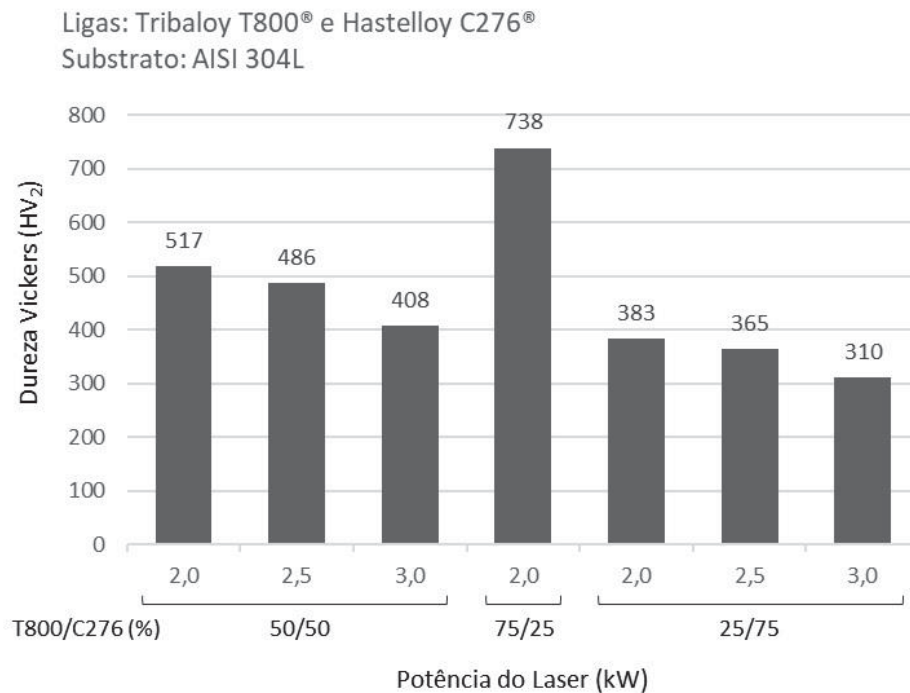
FONTE: O Autor (2024).

4.2.6 Dureza

Conforme mostrado na FIGURA 64, observou-se que quanto maior a quantidade de liga T800® maior a dureza do revestimento. A maior dureza apresentada para a mistura das ligas foi para a amostra do 75% da liga T800® e 25% da liga C276®, porém devido à alta dureza observou-se também grande incidência de trincas neste revestimento. Também foi constatado que, ao contrário dos

revestimentos com a liga T800® sem aditivação, os revestimentos com as misturas das ligas mostraram uma leve redução na dureza à medida que a potência aumentou, provavelmente devido à redução na fração de fases Laves.

FIGURA 64 – DUREZA DOS REVESTIMENTOS DA LIGA TRIBALLOY T800® ADITIVADA COM A LIGA HASTELLOY C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER

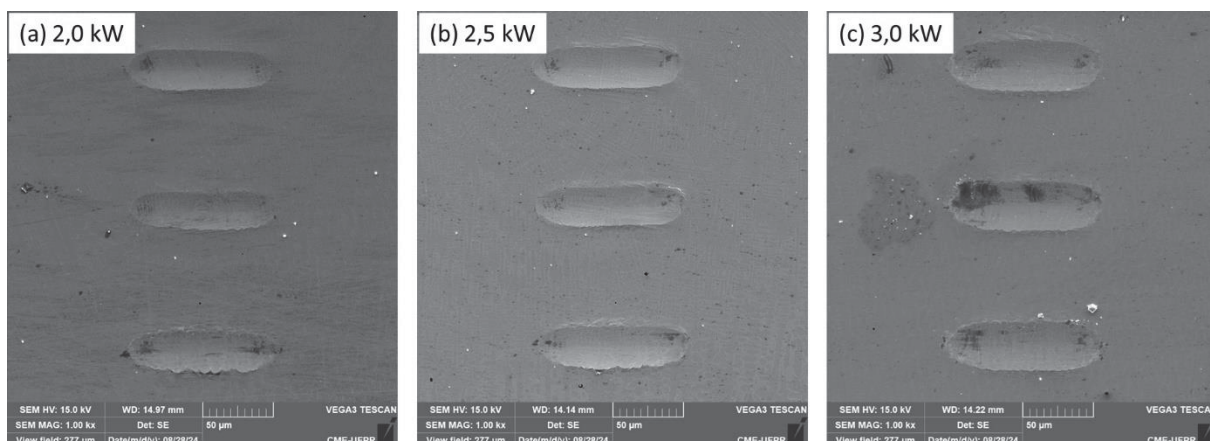


FONTE: O Autor (2024).

4.2.7 Resultados Ensaio de Risco

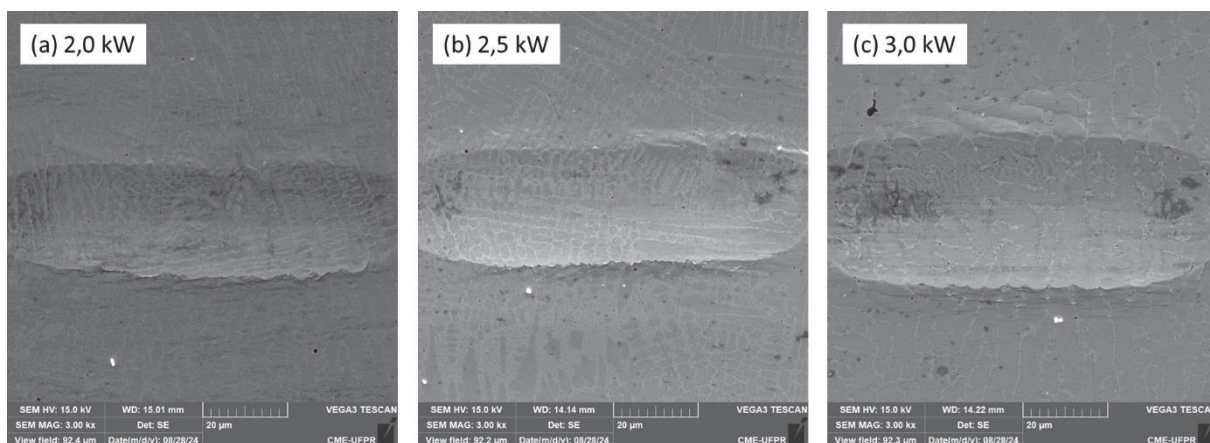
Os resultados obtidos através da dureza Vickers são reforçados através dos ensaios de risco. Pode-se observar na FIGURA 65 a imagem do MEV feito nas amostras depositadas com a mistura das ligas Triballoy T800® e Hastelloy C276® (50% : 50%), o qual evidencia que a amostra depositada com maior potência de laser apresentou riscos mais largos, comprovando uma dureza e resistência ao desgaste menor do que as amostras depositadas com menor potência de laser. Na FIGURA 66 pode-se observar o resultado do MEV após riscamento das amostras citadas com maior ampliação.

FIGURA 65 – MEV DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 50% DE T800® E 50% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS



FONTE: O Autor (2024).

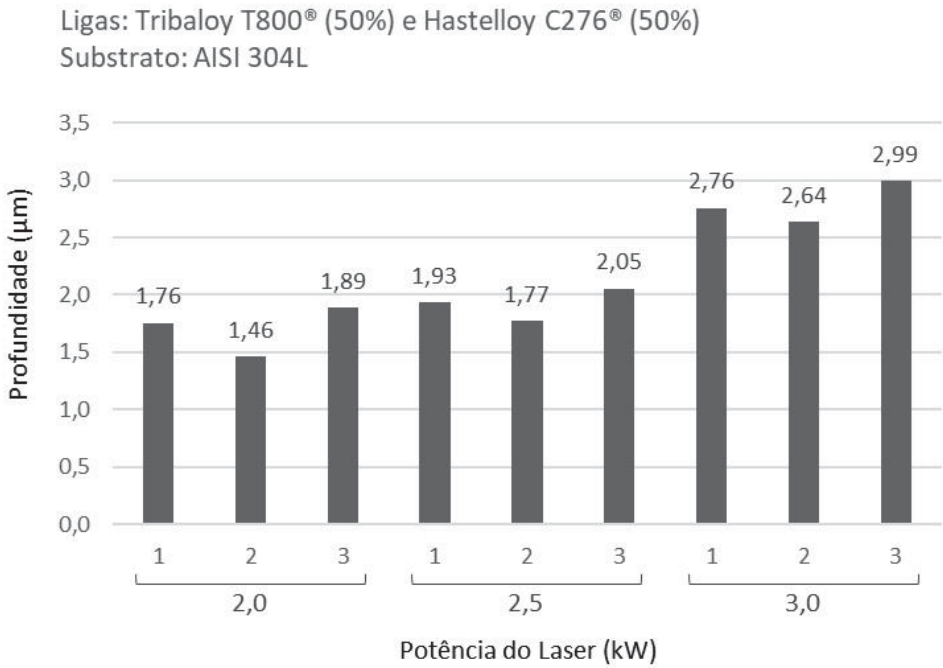
FIGURA 66 – MEV DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 50% DE T800® E 50% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS



FONTE: O Autor (2024).

Por meio das medidas das larguras dos riscos foi possível determinar a profundidade média total de cada um dos três riscos feitos em cada amostra, valores apresentados na FIGURA 67. Sendo 1,70 μm a média de profundidade dos riscos para a amostra depositada com potência de laser de 2,0 kW, 1,92 μm para a amostra depositada com potência 2,5 kW, e 2,80 μm para a amostra depositada com 3,0 kW. Neste caso, quanto maior a potência do laser aplicada, mais profundos foram os riscos, indicando dureza e resistência ao riscamento e desgaste menor para maiores potências de laser.

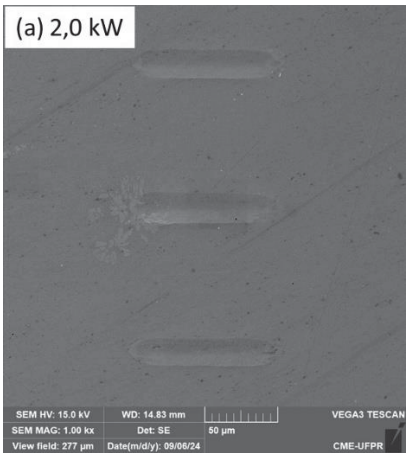
FIGURA 67 – PROFUNDIDADE DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 50% DE T800® E 50% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS



FONTE: O Autor (2024).

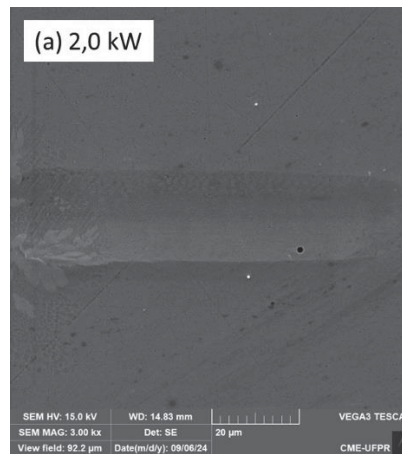
As FIGURAS 68 e 69 trazem o resultado dos riscos realizados na amostra depositada com as ligas Tribaloy T800® a 75% e Hastelloy C276® a 25%. Devido à maior porcentagem da liga T800®, os riscos tiveram largura e profundidade menor, apresentado maior resistência ao desgaste.

FIGURA 68 – MEV DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 75% DE T800® E 25% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE LASER 2,0 kW



FONTE: O Autor (2024).

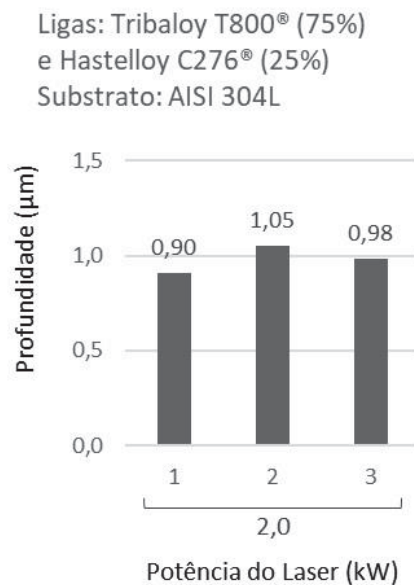
FIGURA 69 – MEV DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 75% DE T800® E 25% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE LASER 2,0 kW



FONTE: O Autor (2024).

As profundidades médias totais de cada um dos três riscos feitos na amostra com 75% da liga Tribaloy T800® e 25% da liga Hastelloy C276® estão apresentados na FIGURA 70. Sendo 0,98 µm a média de profundidade dos riscos para esta amostra.

FIGURA 70 – PROFUNDIDADE DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 75% DE T800® E 25% DE C276® PARA A POTÊNCIA DE LASER 2,0 kW

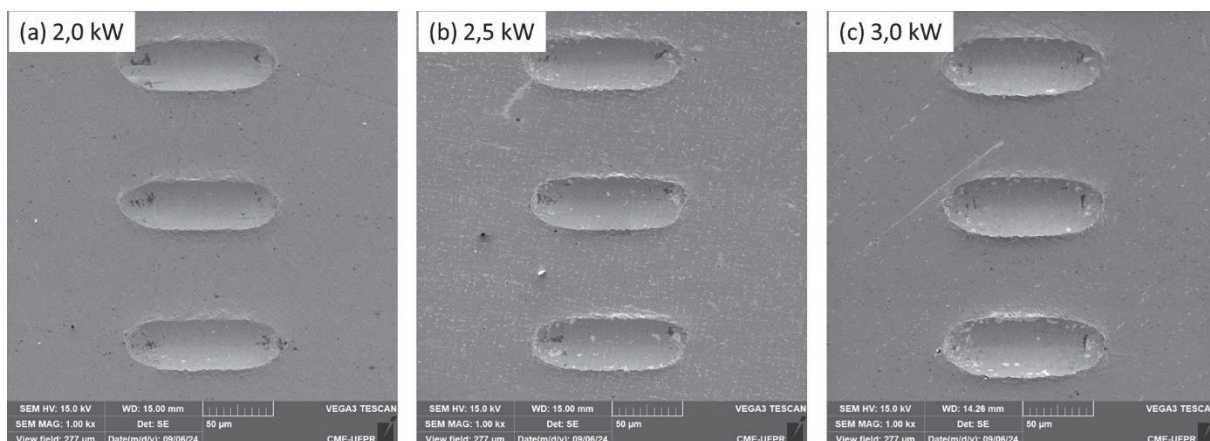


FONTE: O Autor (2024).

O resultado obtido no riscamento das amostras depositadas com as ligas Tribaloy T800® a 25% e Hastelloy C276® a 75% é apresentado nas FIGURAS 71 e

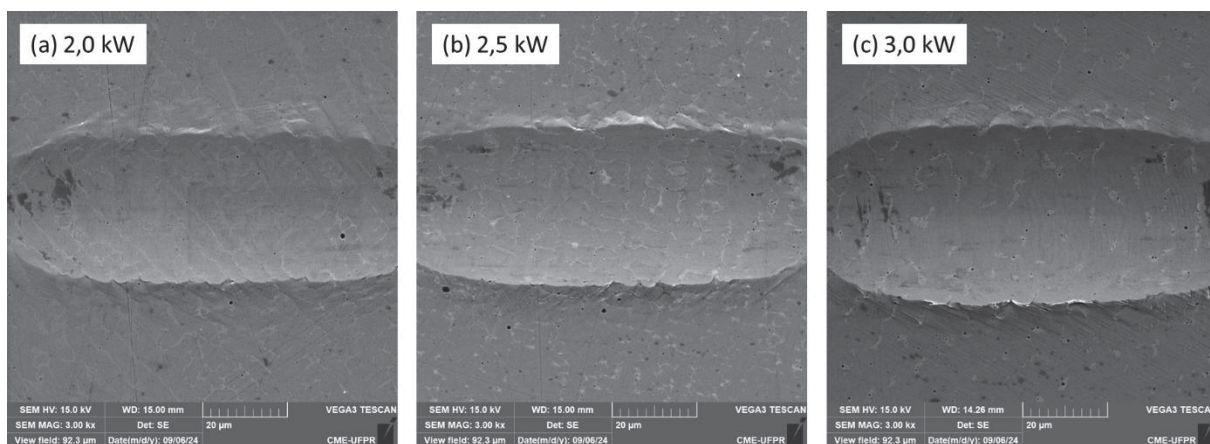
72. Neste caso, devido à maior porcentagem da liga C276®, os riscos tiveram largura e profundidade maior, apresentado menor resistência ao desgaste.

FIGURA 71 – MEV DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 25% DE T800® E 75% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS



FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 72 – MEV DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 25% DE T800® E 75% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS

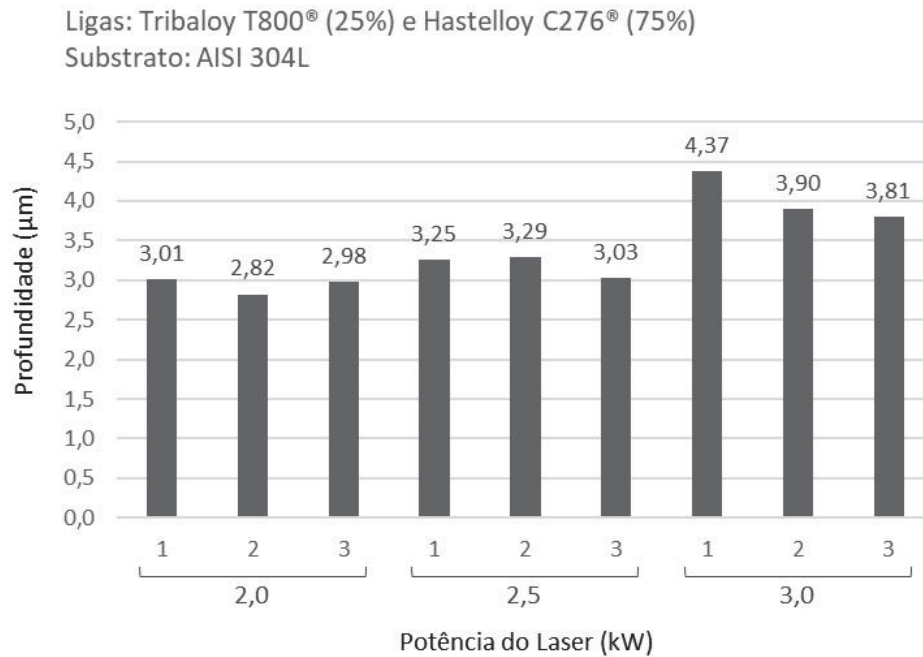


FONTE: O Autor (2024).

A profundidade média total de cada um dos três riscos feitos nas amostras depositadas com 25% da liga Tribaloy T800® e 75% da liga Hastelloy C276® foi estimada e os valores são mostrados na FIGURA 73. Sendo 2,94 µm a média de profundidade dos riscos para a amostra depositada com potência de laser de 2,0 kW, 3,19 µm para a amostra depositada com potência 2,5 kW, e 4,03 µm para a amostra depositada com 3,0 kW. Observa-se que quanto maior a potência do laser aplicada, mais profundos foram os riscos, além disso, estas foram as amostras que tiveram

maior profundidade nos riscos, o que já era esperado, devido à menor porcentagem da liga T800®, que é a liga mais dura e mais resistente.

FIGURA 73 – PROFUNDIDADE DOS RISCOS NOS REVESTIMENTOS DA LIGA COM 25% DE T800® E 75% DE C276® PARA AS DIFERENTES POTÊNCIAS DE LASER AVALIADAS



FONTE: O Autor (2024).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou a geometria do cordão, defeitos, diluição, microestrutura e dureza de revestimentos depositados a laser da liga Tribaloy T800® sem aditivação e com aditivação da liga Hastelloy C276®. As principais conclusões obtidas são apresentadas a seguir.

1. Apesar de apresentar a dureza mais elevada e a maior resistência ao risco, a deposição direta e livre de defeitos da liga Tribaloy T800® se mostrou inviável para os parâmetros de deposição selecionados. Apesar disso, o aumento da potência de Laser parece ter auxiliado a reduzir a taxa de resfriamento o que, juntamente com a diluição, elevou o espaçamento das trincas.

2. A aditivação da liga Tribaloy T800® revelou que 25% de aditivo Hastelloy C276® não foi suficiente para eliminar o trincamento dos revestimentos. Entretanto, a partir de misturas 50:50 (T800®:C276®) o trincamento foi totalmente eliminado para as condições estudadas.

3. A adição da liga C276® promove a redução no teor de Mo e Si e, consequentemente, da fração de fase Laves, levando à redução na dureza e na resistência ao risco.

4. De forma geral, uma maior potência de Laser acentuou a diluição com o substrato AISI 304L, o que agravou a queda de dureza e resistência ao risco dos revestimentos.

5. O presente trabalho revelou um caminho promissor para o processamento de revestimentos de liga Tribaloy T800® livres de trincas depositados a Laser. Apesar da abordagem confirmar a possibilidade de eliminação do trincamento, este depende da síntese de revestimentos com menor resistência ao risco e menor dureza.

REFERÊNCIAS

- ASTM International. **E165/E165M**: Standard Practice for Liquid Penetrant Testing for General Industry. West Conshohocken, 2018.
- BURAKOWSKI, T.; WIERZCHÓN, T. **Surface engeneering of metals: principles, equipment, technologies**. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.
- DUREJKO, T.; ŁAZIŃSKA, M.; DWORECKA-WÓJCIK, J.; LIPIŃSKI, S.; VARIN, R. A.; CZUJKO, T. The Tribaloy T-800 Coatings Deposited by Laser Engineered Net Shaping (LENS™). **Materials**, 12(9), 1366, 2019.
- 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. **Microestrutura e propriedades de revestimentos de liga Hastelloy C276 (NiCrMoW) obtidos por plasma com arco transferido sobre aços API 5L e AISI 316L**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.
- 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**, n. 18, p. 212-221, 2015.
- HOLMBERG, K.; ERDEMIR, A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. **Friction** 5, n. 3, p. 263–284, 2017.
- INCONEL® ALLOY C-276. **Special Metals**, 2023. Disponível em: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-c-276.pdf>. Acesso em 04 de junho de 2023.
- KOCH, G.; VARNEY, J.; THOMPSON, N.; MOGHISSI, O.; GOULD, M.; PAYER, J. **Report: International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study**. NACE International, Houston, Texas, USA, March, 2016. Disponível em: <http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf>. Acesso em 29 de maio de 2023.
- KONG, D.; DONG, C.; NI, X.; ZHANG, L.; MAN, C.; ZHU, G.; YAO, J.; WANG, L.; CHENG, X.; LI, X. Effect of TiC content on the mechanical and corrosion properties of Inconel 718 alloy fabricated by a high-throughput dual-feed laser metal deposition system. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 803, p. 637-648, ISSN 0925-8388, 2019.
- 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.

LIN, J.; HWANG, B. Coaxial laser cladding on an inclined substrate. **Optics & Laser Technology**, n. 31, p. 571-578, 1999.

LIU, R.; XU, W.; YAO, M. X.; PATNAIK, P. C.; WU, X. J. A newly developed Tribaloy alloy with increased ductility. **Scripta Materialia**, n. 53, p. 1351-1355, 2005.

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.

MAHAMOOD, R. M. **Laser Metal Deposition Process of Metals, Alloys, and Composite Materials.** Gewerbestrasse: Springer, 2018.

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.

MURO, M.; LEUNDA, J.; ARTOLA, G.; SORIANO, C. Microstructural Tuning of a Laser-Cladding Layer by Means of a Mix of Commercial Inconel 625 and AISI H13 Powders. **Materials**, n. 12, p. 544, 2019.

NAVAS, C; CADENAS, M.; CUETOS, J. M.; DAMBORENEA, J. Microstructure and sliding wear behaviour of Tribaloy T-800 coatings deposited by laser cladding. **Wear**, n. 260, p. 838-846, 2006.

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

PIZZATTO, A. **Impacto da potência, substrato e adição de reforço particulado sobre as propriedades mecânico-metalúrgicas de revestimentos da liga Hastelloy C276® depositados a laser.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

PIZZATO, A.; TEIXEIRA, M. F.; RABELO, A.; FALCADE, T.; SCHEID, A. Microstructure and Wear Behavior of NbC-Reinforced Ni-Based Alloy Composite Coatings by Laser Cladding. **Materials Research**, 24 (3), e20200447, 2021.

RIVERO, L. E. H. S. **Avaliação de revestimentos de superliga Hastelloy® C276 depositados a laser sobre diferentes substratos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – 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.

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.

SOUZA, W. H.; IGAMI, M. P. Z.; BIDO, D. S. R&D Management and the Stokes Diagram: An Exploratory Study. **Journal of Technology Management & Innovation**, v. 4, i. 4, 2009.

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.

TABERNERO, A.; LAMIKIZ, S.; MARTÍNEZ, E.; UKAR, L. N.; LÓPEZ DE LACALLE, L.N. Geometric Modelling of Added Layers by Coaxial Laser Cladding. **Physics Procedia**, n. 39, p. 913–220, 2012.

THOMAS, J.; MOGONYE, J. E.; MANTRI, S.A.; CHOUDHURI, D.; BANERJEE, R.; SCHARF, T.W. Additive manufacturing of compositionally graded laser deposited titanium-chromium alloys. **Additive Manufacturing**, v. 33, 101132, ISSN 2214-8604, 2020.

TOBAR, M. J.; AMADO, J. M.; ÁLVAREZ, C.; GARCÍA, A.; VARELA, A.; YÁÑES, A. Characteristics of Tribaloy T-800 and T-900 coatings on steel substrates by laser cladding. **Surface and Coatings Technology**, n. 202, p. 2297-2301, 2008.

TOYSERKANI, E.; KHAJEPOUR, A.; CORBIN, S. **Laser Cladding**. Boca Raton, CRC Press LLC, 2005.

TRIBALLOY™ 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 de maio de 2023.

WULPI, D.J. **Understanding How Components Fail**. ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 1999.

ZHU, L.; XUE, P.; LAN, Q.; MENG, G.; REN, Y.; YANG, Z.; XU, P.; LIU, Z. Recent research and development status of laser cladding: A review. **Optics and Laser Technology**, n. 138, 106915, 2021.