

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLOGIA DE JOINVILLE
CURSO ENGENHARIA AUTOMOTIVA

Paulo Rafael Alberton Bloemer

INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE CHANFRO NA QUALIDADE DO REPARO DA LIGA
AISI 316L COM INCONEL 625 ATRAVÉS DE LASER CLADDING

Joinville

[2021]

[Digite texto]

PAULO RAFAEL ALBERTON BLOEMER

INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE CHANFRO NA QUALIDADE DO REPARO DA LIGA
AISI 316L COM INCONEL 625 ATRAVÉS DE LASER CLADDING

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Automotiva do Centro de ciências tecnológicas de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador: Prof. Gabriel Benedit Dutra, Dr.

Coorientador: Moisés Felipe Teixeira, Dr.

Joinville

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Bloemer, Paulo Rafael Alberton
Influência do ângulo de chanfro na qualidade da liga
AISI 316L com Inconel 625 através de laser cladding /
Paulo Rafael Alberton Bloemer ; orientador, Gabriel
Benedet Dutra, coorientador, Moisés Felipe Teixeira, 2021.
61 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,
Graduação em Engenharia Automotiva, Joinville, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Automotiva. I. Dutra, Gabriel Benedet.
II. Teixeira, Moisés Felipe. III. Universidade Federal de
Santa Catarina. Graduação em Engenharia Automotiva. IV.
Título.

Paulo Rafael Alberton Bloemer

INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE CHANFRO NA QUALIDADE DO REPARO DA LIGA
AISI 316L COM INCONEL 625 ATRAVÉS DE LASER CLADDING

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de bacharel
em Engenharia Automotiva e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia
Automotiva

Joinville, 30 de abril de 2021.

Prof. Modesto Hurtado Ferrer, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Gabriel Benedet Dutra, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Moisés Felipe Teixeira, Dr.
Coorientador
Instituto SENAI de Inovação de manufatura e Processamento a Laser

Prof. Modesto Hurtado Ferrer, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Leandro João da Silva, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Uberlândia

Este trabalho é dedicado a todos os meus professores, em especial aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Mateus Bloemer e Luzia Biancato Alberton e minha namorada Bianca Michels Albino, que sempre me apoiaram e incentivaram nessa jornada bem como todos os familiares que me acompanharam ao longo dessa jornada.

Ao professor e orientador Dr. Gabriel Dutra pela orientação, disponibilidade e paciência para auxiliar no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Moises Felipe Teixeira pela oportunidade de trabalhar com a tecnologia laser e desenvolver este trabalho. Também por sua grande contribuição como coorientador.

Aos colegas de plataforma Vitor, Jeferson, Marcelo, Osmar, Gabriel, bem como Luciano e Thiago Fernandez, que tanto contribuíram para este trabalho. Aos colegas do Instituto Senai de Inovação em Sistema de Manufatura e Processamento a Laser pelos ensinamentos, companheirismo e auxílio em todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho e período de estágio.

Ao Instituto Senai de Inovação em Sistemas de Manufatura e Processamento a Laser por permitir o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina e aos professores por proporcionarem uma formação de qualidade.

Aos colegas de universidade, Matheus Beuther, Gabriel Borges, Casaril, Hein, Belega, Córdova, Oberdan e Renée pelo companheirismo ao longo dessa jornada.

Aos colegas da equipe do projeto formula CEM que teve um grande impacto na minha formação em especial ao time do fahrwerk ao qual convivi intensamente, Ariel, Stella, DK, Nomura, Yago, André, Serpa, Gustavo, Lucas (Negot), Kiemo e ao professor Modesto que me inspirou e orientou em toda esta jornada.

RESUMO

O reparo de componentes metálicos de elevado custo permite trazer peças danificadas de volta a operação de uma maneira rápida, efetiva e economicamente atraente. Além disso, este processo pode estender o ciclo de vida dos componentes, através de melhorias nas propriedades superficiais, como resistência a corrosão e desgaste, via reparo ou revestimento. Este trabalho avaliou a morfologia e integridade da deposição de pó metálico da superliga de níquel - Inconel 625, sobre os substratos de aço AISI 316L, para os ângulos de chanfro de 120°, 135° e 150°. Corpos de prova com três diferentes ângulos de chanfro foram fabricados, a fim de caracterizar a distorções provenientes do processo de reparo. Foram realizadas medições por escaneamento a laser, usando o braço de medição a laser da empresa Faro, antes e depois do procedimento de reparo. Para avaliar a microestrutura e morfologia, foram conduzidas análises no microscópio ótico. A composição do material depositado na região de reparo, foi avaliada por meio da análise de Espectroscopia de Energia Dispersiva (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* - EDS), que fica acoplada no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Foram realizadas medições de dureza Vickers no perfil transversal da deposição. Os resultados das medições de distorção mostraram que, a intensidade de distorção na direção transversal é maior longitudinal em todas as condições avaliadas. Na contabilização de descontinuidades do perfil transversal, as regiões apresentaram os valores de (0,09 %, 0,22 %, 0,39%) para os ângulos de chanfro de 150°, 135° e 120° respectivamente. A respeito da microestrutura, a amostra selecionada com chanfro de 150° mostrou uma estrutura preferencialmente dendrítica do tipo equiaxial, com crescimento de algumas estruturas dendríticas colunares. Foi verificado que, maiores ângulos de chanfro são mais apropriados com respeito a morfologia, embora favoreçam níveis de distorção mais elevados, em decorrência da maior quantidade de calor fornecida durante o processo de deposição. Em relação a dureza, foi observado que a baixa concentração de carbono suprimiu o pico característico da zona termicamente afetada.

Palavras-chave: Laser *cladding*. Inconel 625. Reparo de chanfro.

ABSTRACT

Repairing high-cost metal components allows damaged parts to be brought back into operation in a fast, effective and economically attractive way. In addition, this process can extend the life cycle of components, through improvements in surface properties, such as corrosion and wear resistance, via repair or coating. This work will evaluate the morphology and integrity of the deposition of metallic powder of the nickel superalloy - Inconel 625, on AISI 316L steel substrates, for the notch angles of 120 °, 135 ° and 150 °. Specimens with three different groove angles were manufactured in order to characterize the deformations arising from the repair process. Measurements were made by laser scanning, using the laser measurement arm of the company Faro, before and after the repair procedure. To assess the microstructure and morphology, analyzes were performed under the optical microscope. To assess the microstructure and morphology, analyzes were performed under the optical microscope. The composition of the material deposited in the repair region was evaluated through the analysis of Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), which is attached to the Scanning Electron Microscope (SEM). Vickers hardness measurements were made in the cross section of the deposition. The results of the deformation measurements showed that the intensity of deformation in the transverse direction is greater longitudinal in all evaluated conditions. In the account of discontinuities of the transversal profile, the regions presented the values of (0.09%, 0.22%, 0.39%) for the groove angles of 150 °, 135 ° and 120 ° respectively. Regarding the microstructure, the sample selected with a chamfer of 150 ° showed a preferentially dendritic structure of the equiaxial type, with the growth of some columnar dendritic structures. It was found that greater chamfer angles are more appropriate with respect to morphology, although they favor higher levels of deformation, due to the greater amount of heat provided during the deposition process. Regarding hardness, it was observed that the low carbon concentration suppressed the characteristic peak of the thermally affected zone.

Keywords: Inconel 625. Laser Cladding. Groove Repair.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comportamento em fadiga da liga Inconel 625.....	21
Figura 2: Reparo superfície de vedação de motor naval	22
Figura 3: (a) Processo de absorção, (b) emissão espontânea e (c) emissão estimulada.	24
Figura 4: Esquema de cavidade ressonante em fontes de Laser.....	25
Figura 5: Deposição de único estágio (esquerda), deposição dois estágios (direita).	26
Figura 6: Parâmetros de processo.....	28
Figura 7: Esquema representativo do sistema de deposição.	29
Figura 8: Regime operacionais de técnicas de processamento a laser.	30
Figura 9: Variáveis de entrada para tensão residual.....	32
Figura 10: Reparo em campo de turbina de gás.	34
Figura 11: (a) Partículas da liga Inconel 625 atomizado a gás; (b) seção transversal das partículas.	36
Figura 12: Equipamento PRECO SL 8600.....	37
Figura 13: Estratégia de deposição no DOE.	38
Figura 14: Parâmetro resultante da modelagem.	39
Figura 15: Vista transversal dos substratos fresados.....	40
Figura 16: Substratos após jateamento de areia	40
Figura 17: Deposição do reparo	41
Figura 18: Medições de área fundida lateral.	42
Figura 19: Processamento das discontinuidades.....	43
Figura 20: Perfis de distorção na vista superior.	45
Figura 21: Pontos de distorção característico.....	46
Figura 22: Módulo da distorção pontual.	46
Figura 23: Falta de fusão na região de ligação com metal de base.	49
Figura 24: Área fundida na superfície lateral do reparo.....	50
Figura 25: Microestrutura na deposição do CP 3.....	51
Figura 26: Microestrutura MEV região central 10000x.....	52
Figura 27: Perfil de microdureza transversal	53
Figura 28: Dureza na lateral do reparo	55
Figura 29: Superfícies de resposta.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química do aço inoxidável AISI 316L.	18
Tabela 2: Requisitos mecânicos do aço inoxidável AISI 316L.....	18
Tabela 3: Composição química Inconel 625	20
Tabela 4: Tensões típicas para elevadas temperaturas do Inconel 625	20
Tabela 5: Propriedades Físicas do Inconel 625.....	22
Tabela 6: Aplicação de Laser <i>cladding</i>	35
Tabela 7: Composições químicas fornecidas pelo fabricante.	37
Tabela 8: Parâmetros do equipamento usados no processo.	37
Tabela 9: Parâmetros de saída desejados.	39
Tabela 10: Energia aportada ao CP.	44
Tabela 11: Percentual de descontinuidades.....	48
Tabela 12: Composição química pontual	53
Tabela 13: Parâmetros avaliado no DoE	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAD *Computed Aided Design*

CFC Cúbica de face Centrada

CP Corpo de Prova

DOE Design of Experiment

EDS *Energy-dispersive X-ray spectroscopy*

ISI Instituto SENAI de Inovação

L-DED *Laser Direct energy deposition*

LC *Laser Cladding*

LMD *Laser Metal Deposition*

MEV Microscopia Eletrônica de Varredura

MO Microscópio Ótico

ZTA Zona Termicamente afetada

VV Velocidade de Varredura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBEJETIVO GERAL	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	MATERIAIS UTILZADOS	17
2.1.1	Aço inoxidável AISI 316L	17
2.1.2	Inconel 625.....	19
2.2	PROCESSAMENTO A LASER	23
2.3	LASER <i>CLADDING</i>	25
2.4	FENÔMENOS FÍSICOS DO PROCESSO	29
2.5	DISTORÇÃO E TENSÃO RESIDUAL	31
2.6	APLICAÇÕES DE LASER <i>CLADDING</i>	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1	DISTORÇÃO GEOMÉTRICA	44
4.2	VALIAÇÃO DOS DEFEITOS MORFOLÓGICOS DA DEPOSIÇÃO	47
4.3	MICROESTRUTURA.....	50
4.4	MICRODUREZA	53
5	CONCLUSÃO.....	56
5.1	TRABALHOS FUTUROS	57
	REFERÊNCIAS.....	58
	APÊNDICE A – Parâmetros avaliados no DoE de definição de parâmetro..	61
	APÊNDICE B – Superfícies de Resposta	62

1 INTRODUÇÃO

O reparo de componentes metálicos de elevado custo permite trazer peças danificadas de volta a operação de uma maneira rápida, efetiva e economicamente atraente. Além disso, este processo pode estender ciclo de vida dos componentes, causado por melhorias nas propriedades dos componentes revestidos ou reparados, como aumento de resistência a corrosão e desgaste.

Em aplicações particulares ou em escala reduzida, os reparos têm sua relevância acentuada, ao passo que componentes críticos de aeronaves, plantas nucleares, químicas, de geração de energia entre outros, são custosos e complexos de desenvolver e fabricar. A recuperação desses equipamentos agrega imenso valor, ao permitir que componentes possam ser reparados ao invés de substituídos: reduzindo *lead time*, eliminando estoques, reduzindo custos diretos e indiretos, como o tempo de inatividade (*downtime*).

Dentre as técnicas usuais de reparo, estão disponíveis os métodos de revestimento tradicionais como *thermal spraying*, *plasma spraying* e soldagem a arco, adicionando o mesmo material ou materiais semelhantes nas regiões críticas. No entanto, segundo Song *et al.* (2016), essas soluções têm limitações severas, como a grande zona térmica afetada, grande distorção, pouca precisão dimensional, qualidade superficial de baixa qualidade, falta de fusão. Uma das técnicas que vem ganhando relevância pela capacidade de atender as demandas citadas, é o Laser *Cladding*. Este é caracterizado como um processo de deposição de metais, com baixo aporte de calor, que proporciona baixa diluição e com distorção significativamente reduzida em relação a processos de soldagem a arco (HEIGEL; MICHALERIS; PALMER, 2015).

Este processo faz parte do conceito de *Laser – Directed Energy Deposition (L-DED)*, que assim como outros métodos de manufatura aditiva, estão sendo aprimorados e detém capacidades ímpares, não encontradas em processos de manufatura convencionais. Como a deposição a laser não requer ferramentas pesadas, o design das peças pode ser facilmente modificado para adaptá-las às necessidades do mercado e a personalização é facilitada, uma característica importante na produção de peças para fins específicos (HASIMI, 2014).

Entretanto são poucos os estudos que avaliam viabilidade geométrica de reparo. Questões como a adesão do material de adição e falta de fusão em plano inclinados são pouco abordadas, esses conhecimentos práticos são imprescindíveis para difusão da tecnologia. Como consequência da popularização, há uma tendência de diminuição dos custos de implementação

e consumíveis, fazendo-se mais acessível e melhorando o entendimento de profissionais de manufatura.

A aplicação de um material com propriedades mecânicas ou químicas superiores ao substrato na região de reparo é estratégica, uma vez que o componente está mais suscetível a falhar na região de maior solicitação, podendo manter o componente fabricado com material de menor custo e garantir suas propriedades apenas nas regiões desejadas.

Portanto, o presente trabalho anseia avaliar morfologia e integridade da deposição descontinuidades em chapas metálicas de aço AISI 316L, para diferentes ângulos de chanfro, causadas pelas altas taxas de resfriamento, provenientes do processo de deposição de metais a laser – *Laser Cladding* usando Inconel 625 como metal de adição.

1.1 OBEJETIVO GERAL

Avaliar diferentes ângulo de chanfro na qualidade do reparo da liga AISI 316l com Inconel 625 através de laser cladding

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a influência de diferentes ângulos de chanfro na morfologia e integridade da deposição, em relação a zona de diluição, presença de defeitos características da deposição.
- Mensurar a área fusão do metal de adição no substrato com diferentes ângulos de chanfro.
- Observar influência dos diferentes ângulos de chanfro na distorção do substrato.
- Avaliar a microestrutura do metal de adição, o qual apresentar as condições mais apropriadas de deposição e comparar com os resultados reportados na literatura.
- Aferir dureza no perfil transversal da deposição e buscar elementos na literatura que esclareçam os efeitos observados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo serão abordados os principais assuntos que fazem referência ao trabalho realizado, de forma a embasar o leitor a ter condições de entender o tema proposto.

2.1 MATERIAIS UTILZADOS

Como este trabalho irá abordar o desenvolvimento de deposição via laser cladding da superliga de níquel sobre o aço inoxidável AISI 316L, as principais características de ambos os materiais serão abordadas nos subcapítulos a seguir.

2.1.1 Aço inoxidável AISI 316L

De acordo com Ion (2005), existem quatro tipos de aços inoxidáveis, aos quais são caracterizados quanto a suas microestruturas em temperatura ambiente, são eles: austenítico, ferrítico, martensítico e duplex. Sendo último uma combinação entre as microestruturas ferrítica e austenítica. Esses materiais têm o custo de aquisição elevado, entretanto sua aplicação é justificada em aplicações submetidas a corrosão, por prologar a vida útil.

Para serem considerados inoxidáveis, os aços devem conter um mínimo de 10,5% em massa de Cr. Em aços austeníticos essa concentração costuma ser ainda maior e essa condição afere a este tipo de matéria uma camada passivadora que inibe a corrosão.

O tipo mais comum de aço inoxidável austenítico é o 18-8, contendo cerca de 18 % Cr e 8 % Ni em massa. Este, tem a menor quantidade de níquel, acompanhado de uma estrutura totalmente austenítica. Os aços inoxidáveis possuem vasta aplicação na indústria devido a sua ótima resistência aos ambientes corrosivos, aliados à boa ductibilidade. Estas características são melhoradas ao passo que se aumenta o teor de níquel. Já o aumento do cromo melhora a resistência à corrosão intergranular (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2017).

No processo de soldagem dos aços inoxidáveis, existe a possibilidade de formação dos carbonetos, que precipitam em contornos de grão e retiram o cromo do aço que estaria em solução sólida, fazendo com que as regiões adjacentes fiquem empobrecidas e, quando colocadas em meio aquosos e podem sofrer do processo corrosivo conhecido como corrosão intergranular.

Isto pode acontecer quando algum elemento se combina com o cromo, normalmente o carbono formando carbonetos, e por vezes o nitrogênio formando nitretos. A faixa de temperaturas de formação dos carbonetos de cromo, conhecida como sensitização, é entre 400 °C e 800 °C; e durante a soldagem a região que passa maior tempo dentro desta faixa está situada um pouco afastada da solda (CARBÓ, 2008).

A literatura apresenta que este aço é muito usado na manufatura aditiva por suas boas propriedades mecânicas, alta resistência à corrosão e boa soldabilidade, resultante do baixo teor de carbono 0,03% presente na liga (CASATI; LEMKE; VEDANI, 2016).

A composição química nominal do material dada pelo fabricante é apresentada na Tabela 1. A alta concentração de Cr causa o efeito de resistência a corrosão por pite, enquanto o níquel é o principal responsável pela característica de boa soldabilidade por ter alta solubilidade, como será apresentado na Seção 2.1.2.

Tabela 1: Composição química do aço inoxidável AISI 316L.

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Fe
0,03	2,00	0,04	0,03	0,75	16-18	10-14	2-3	0,1	Bal.

Fonte: ASTM International A240/A240M-19. (2019)

A solubilidade de impurezas como enxofre e fósforo é menor na austenita, tornando os aços inoxidáveis austeníticos mais sensíveis à formação de trincas de solidificação, em especial, quando a solidificação primária é completamente austenítica. Na Tabela 2 são apresentados os requisitos mecânicos para o material. Aços austeníticos não se fragilizam e apresentam baixa tensão a escoamento, isso contribui para ter níveis de tensões residuais menores comparado a materiais que endurecem por tratamento térmico e reduz o risco de trincamento.

Tabela 2: Requisitos mecânicos do aço inoxidável AISI 316L.

Limite de resistência a tração mínima (MPa)	Tensão de escoamento mínima (MPa)	Alongamento mínimo (%)	Dureza máxima (HV)
485	170	40	217

Fonte: ASTM International A240/A240M-19. (2019)

As principais limitações da liga AISI 316L e dos aços inoxidáveis austeníticos é a corrosão sob tensão. Um grande aumento no teor de níquel diminui o risco de corrosão sob tensão.

2.1.2 Inconel 625

Superligas de níquel são uma classe de materiais com uma combinação de propriedades particular de alta resistência em elevadas temperaturas, tenacidade e resistência à degradação em ambientes corrosivos ou oxidantes, sendo largamente aplicados em aeronaves, turbinas de geração de energia, motores de foguete e plantas de processamentos químicos (POLLOCK *et al.*, 2006).

Razdolescu *et al.* (2002), descrevem que o níquel tem boa resistência à corrosão, e serve como uma excelente base para desenvolver ligas que contenham propriedades únicas ao fazer ligação com elementos específicos. Ligas de níquel têm grande solubilidade para diversos elementos de liga, em decorrência da microestrutura CFC (Cúbica de Face Centrada) austenítica (γ), na qual partículas de dispersão e solução podem se formar com facilidade. O níquel pode diluir cerca de 35% Cr, 20% de molibdênio e tungstênio, 5 a 10% de alumínio, titânio manganês e vanádio. Deste modo a matriz dúctil e resistente de CFC pode dissolver grandes porções de elementos ligantes que conferem aumento de dureza, resistência a corrosão e oxidação.

Desta forma é possível realizar a aplicação do Inconel 625 em reparo de AISI, dada a compatibilidade entre os materiais. Os principais elementos dessas ligas: Fe e Ni tem grande solubilidade.

Existe uma ampla variedade de aplicações para superligas de níquel, que em sua maioria envolvem as características de resistência a corrosão e calor. Alguns desses exemplos mais difundidos são:

- Indústrias químicas e petroquímicas: tubulações.
- Aeroespacial: câmaras de combustão, sistemas de exaustão, hélices.
- Indústria de óleo e gás e energia: hélices, válvulas, sedes, tubulações.
- Indústria automotiva: Vela de ignição, conversores catalíticos, coletores de exaustão.

A liga comercial conhecida como Inconel 625, será empregada no estudo de caso deste trabalho. Segundo Razdolescu *et al.* (2002), a composição química deste material deve atender a especificação mostrada na Tabela 3.

Tabela 3: Composição química Inconel 625

Elemento	Cr	Fe	Mo	Cb+Ta	C	Mn	P	S	Ti	Al	Co	Ni
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Mínimo	20	-	8	3,15	-	-	-	-	-	-	-	58
Máximo	23	5	10	4,15	0,10	0,5	0,015	0,015	0,4	0,4	1,0	-

Fonte: adaptado de Razdolescu *et al.* (2002)

Entre as propriedades mecânicas, pode-se destacar o comportamento em elevadas temperaturas. Na Tabela 4 são apresentados os valores para propriedades de limite de resistência e tensão de escoamento em função da temperatura de operação.

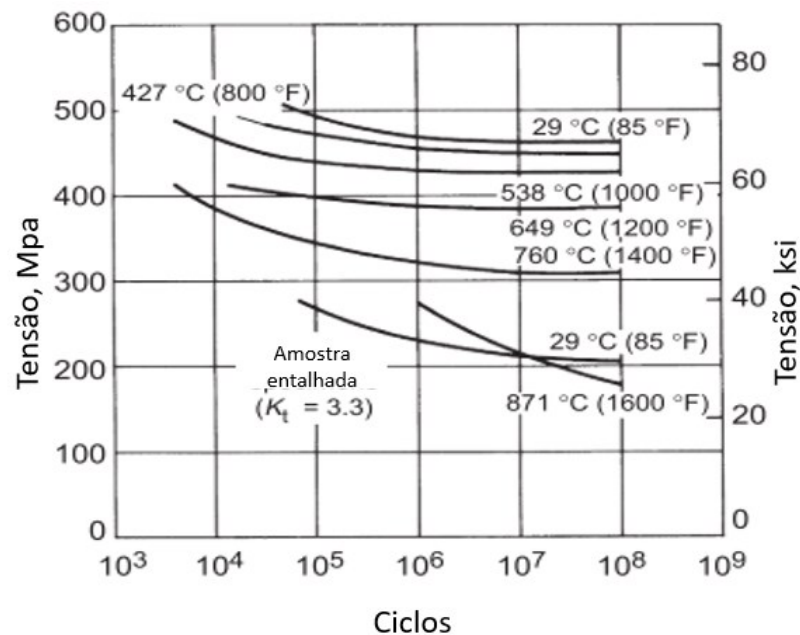
Tabela 4: Tensões típicas para elevadas temperaturas do Inconel 625

Temperatura	Limite de resistência	Tensão de escoamento	Alongamento
[°C]	[MPa]	[MPa]	[%]
21	855	490	50
540	745	405	50
650	710	420	35
760	505	420	42
870	285	475	125

Fonte: adaptado de Razdolescu *et al.* (2002)

O Inconel 625 apresenta uma elevada resistência à fadiga em alta temperatura, as fases intermetálicas formadas entre os elementos ligados, como precipitados de Ni_3Al e Ni_3Ti (γ'), impedem os deslocamentos em temperatura elevadas e estabilizam a solução sólida (SCHEITZER, 2014; RAZDOLESCU *et al.*, 2002). Na Figura 1 são mostradas curvas de limite de resistência do material submetido a esforços cíclicos em diferentes temperaturas.

Figura 1: Comportamento em fadiga da liga Inconel 625.



Fonte: adaptado de Razdolescu *et al.* (2002)

Essa característica é particularmente importante em componentes de máquinas térmicas, onde é indispensável uma análise de mecânica da fratura para evitar falhas por esforços cíclicos as quais estão submetidos estes equipamentos. A maioria das falhas em máquinas acontece devido a cargas que variam no tempo. Em temperaturas acima de aproximadamente 50% da temperatura de fusão absoluta do material, a fluência passa a ser um fator significativo para o comportamento do material da peça e a abordagem do modelo tensão-número de ciclos não é mais válida (NORTON, 2013).

O processamento de materiais a laser é fortemente influenciado pelas propriedades físicas do material, e conhecê-las é fundamental para prever e mitigar defeitos provenientes da interação entre essas propriedades. De acordo com Ion (2005), é comum o surgimento de trincas de solidificação na deposição de camadas com ligas duras, devido às partículas duras atuarem como elevadores de tensão. As trincas originadas por tensão térmica são provenientes

de altos gradientes térmicos durante o resfriamento. Diferentes coeficientes de expansão térmica também podem causar trincas assim como o processo de laminação.

Tabela 5: Propriedades Físicas do Inconel 625.

Propriedades	Unidades
Densidade	8,44 g/cm ³ a 20 °C
Temperatura de líquido	1350 °C
Temperatura de sólido	1290 °C
Coeficiente de expansão térmica	14 µm/m.K a 538 °C 15,8 µm/m.K a 871 °C
Calor específico	410J/kg.K a 21 °C
Condutividade Térmica	9,8 W/m.K a 21 °C
Permeabilidade magnética	1,006 a campo de força de 15,9 kA/m

Fonte: adaptado de Razdolescu *et al.* (2002)

Outros parâmetros como a condutividade térmica influenciam na dissipação de calor, afetando a microestrutura da camada depositada. Na Tabela 5 são apresentadas algumas das propriedades físicas do Inconel 625.

Figura 2: Reparo superfície de vedação de motor naval



Fonte: International cruise ship industry. (2020)

Na Figura 2 é possível visualizar aplicações típicas de superliga de níquel em reparo, neste caso um motor do cruzeiro Stena Saga é reparado com aplicação de laser *cladding*. O componente atua em elevada temperatura e é submetido a ciclos térmicos e esforços mecânicos, para atender tais demandas o material de adição utilizado foi Inconel 625.

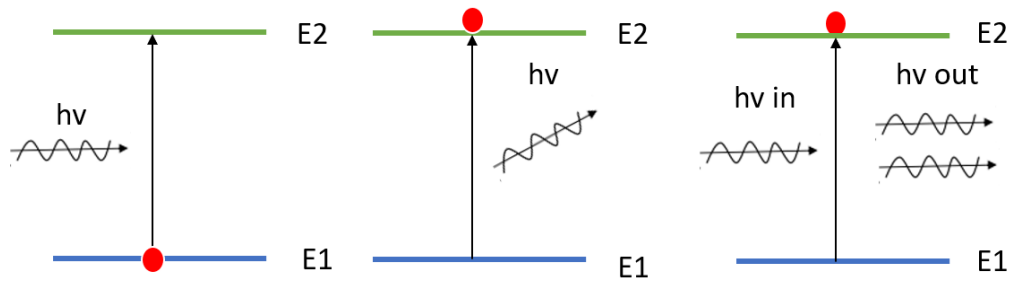
2.2 PROCESSAMENTO A LASER

O Laser é uma onda eletromagnética, com características únicas, como coerência monocromática e colimada. Ele é gerado por um sistema capaz de gerar e amplificar a radiação eletromagnética com características peculiares em diferentes faixas do espectro eletromagnético. Em uma fonte de Laser, a radiação é emitida por parte de um “meio ativo” com composição e forma controlados.

De acordo com Ion (2005) o meio ativo recebe energia “ $h\nu$ ” representado no esquema da Figura 3, onde h é a constante de Plank e ν é a frequência proveniente de um sistema de bombeamento, transferindo os elétrons de um estado de menor energia, para um de energia mais alto, como mostrado na Figura 3 (a). Esses níveis energéticos podem ser: estados eletrônicos de um átomo ou íon, estados eletrônicos vibracionais ou torcionais em uma molécula, dependendo do meio ativo.

Após a excitação, os elétrons tendem a decair para o nível energético fundamental, através de efeitos quânticos, emitindo radiação eletromagnética. Existem dois caminhos para este processo. A forma mais simples de Laser é baseada na transição entre dois níveis de energia E_2 e E_1 , as quais representam os estados excitados e de menor energia, respectivamente. Segundo Steen e Mazumder, (2010) na emissão espontânea, os elétrons espontaneamente relaxam ao nível de energia mais baixo e ao fazê-lo, emitem fóton e/ou fônon na frequência de transição entre tais níveis energéticos. A luz produzida por emissão espontânea é conhecida como luminescência, na Figura 3 (meio) é ilustrado o processo.

Figura 3: (a) Processo de absorção, (b) emissão espontânea e (c) emissão estimulada.



Fonte: O autor com base em Ion *et al.* (2005)

No segundo caso, não há absorção do fóton incidente, e a emissão estimulada ocorre ao passo que o fóton incidente com frequência ótica adequada induz o decaimento de um segundo fóton do nível E2 para E1 como mostrado na Figura 3 (direita). O fóton emitido está em fase com o fóton incidente, possuindo o mesmo sentido de polarização, mesma direção. Isso leva a emissão de fótons com uma coerência temporal e espacial.

Esse processo é predominante em uma fonte de Laser. Para que ocorra eficientemente, o meio ativo deve estar em um estado energético elevado. Essa condição é conhecida como inversão de população (*population inversion*) (STEEN; MAZUMDER, 2010).

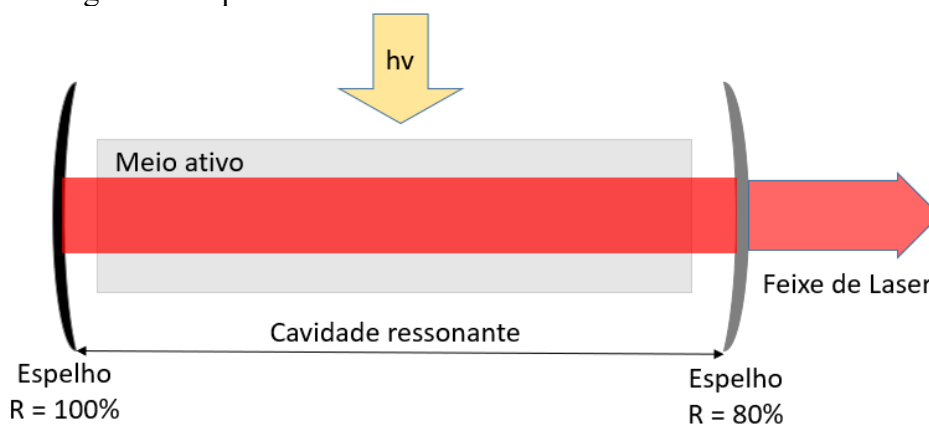
Na Figura 4 é apresentado um esquema que exemplifica o processo de amplificação da luz, onde o bombardeio de fótons em um meio ativo provoca a emissão espontânea e estimulada sendo que ao passo que os fótons são estimulados passam a estimular outros fótons. Esse princípio é o que sustenta o funcionamento do Laser, e ocorre apenas quando está em dispositivo com as características apropriadas.

Segundo Ion (2005), a amplificação é atingida pelo ganho de energia do sistema e existem dois tipos de ganhos, o saturado e o insaturado. O ganho insaturado se refere a pequenos ganhos de sinal com pequenos valores de entrada. Em contraste, a alta excitação de fótons passando entre a cavidade ótica, esgota a inversão de população e o ganho é saturado.

Esse processo ocorre com o meio ativo em confinamento dentro da cavidade ótica, que permite a ressonância entre os espelhos para então direcionar uma pequena porcentagem do feixe de Laser para fora da cavidade. A Figura 4 mostra um esquema do processo descrito.

A radiação a Laser é uma onda magnética, como a luz branca, no entanto existem propriedades que diferenciam a sua interação com outro meio e tornam o Laser aplicável ao processamento de materiais.

Figura 4: Esquema de cavidade ressonante em fontes de Laser.



Fonte: O autor.

Uma dessas propriedades é o comprimento de ondas bem definido. De acordo com Steen e Mazumder (2010), o comprimento de onda depende da transição assumida na emissão e a radiação do Laser tem a forma espectral entre as mais puras disponíveis. Os autores destacam que o laser tem uma radiação coerente espacial, ou seja, as ondas se propagam sem alterar o seu comprimento de onda. Essa coerência permite efeitos de interferência como calibração de comprimento, “*speckle interferometry*”, holografia e medição de velocidade de Doppler.

Outra característica que diferencia o Laser da luz branca comum é ser colimado, ou seja, tem a possibilidade de ser focado em qualquer ponto do espaço. O feixe pode ser focado em escala micrométrica, gerando intensidades óticas extremamente altas. Esse efeito é possível devidos a forma como as ondas eletromagnéticas se propagam de forma paralela.

2.3 LASER CLADDING

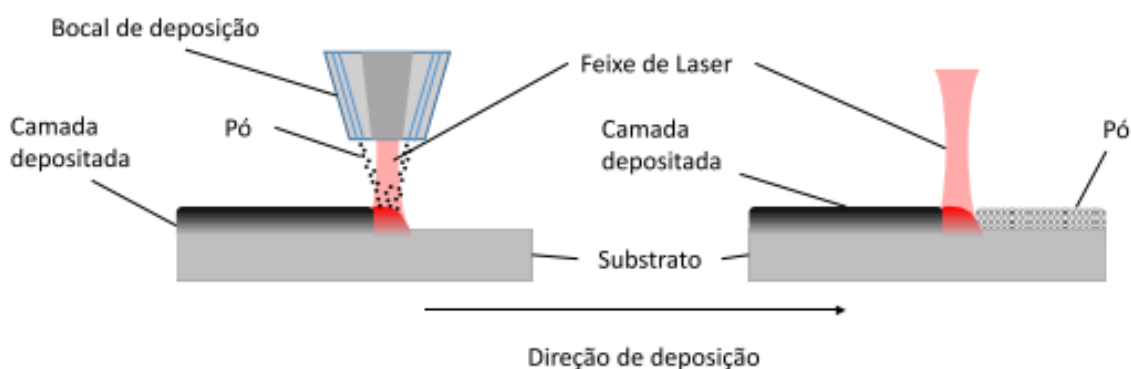
Laser *cladding* é uma tecnologia emergente no campo revestimento e reparo de componentes metálicos. A alta densidade de energia, aliada a possibilidade de automação, permite alta qualidade de revestimento com mínima diluição e forte adesão entre substrato e material de adição. Essas características permitem ainda, fabricação de protótipos rápidos e reparo de componentes (ZANARIN, 2015). Meng *et al.* (2019) destacam a pequena zona termicamente afetada, baixa distorção e alta eficiência de deposição como características do processo.

De acordo com Ion (2005), aporte térmico, causa pequenas distorções que levam a uma redução de tratamentos posteriores de usinagem. O controle de diluição garante a obtenção da composição química desejada no revestimento, bem como da qualidade de deposição, formando revestimentos com baixa porosidade e poucos defeitos como inclusões e trincas. As condições de resfriamento resultam em uma microestrutura refinada que aferem propriedades de desgaste e corrosão superiores em relação a microestruturas menos refinadas. Elevadas taxas de resfriamento também resultam em formação de fases metastáveis e amplia a solubilidade sólida fatores que a aprimoram as propriedades mecânicas. No entanto, taxas de resfriamento altas, aumentam a sensibilidade do revestimento com relação ao aparecimento de trincas. Uma medida que pode ser adotada para mitigar esse efeito é utilização de um pré-aquecimento, através da utilização de base aquecida.

As técnicas de deposição são comumente classificadas quanto ao método de alimentação do material de adição na peça de trabalho: dois estágios onde o pó é pré-colocado sobre o material de trabalho ou de único estágio onde a adição e a fusão de material são desempenhadas simultaneamente.

O processo de único estágio foi criado com intuito de permitir a automatização da técnica (STEEN; MAZUMDER, 2010). De acordo com Schweitzer (2014), esse processo apresenta várias vantagens como: operação de geometrias complexas devido a capacidade de suprir metal na região de fusão, eficiência para grandes áreas, permite construção e reparo de partes de alto valor agregado de forma economicamente eficiente. Na Figura 5 são observados os dois métodos de forma comparativa, onde a esquerda tem-se a deposição de único estágio e a direita e mostrado o processo de dois estágios.

Figura 5: Deposição de único estágio (esquerda), deposição dois estágios (direita).

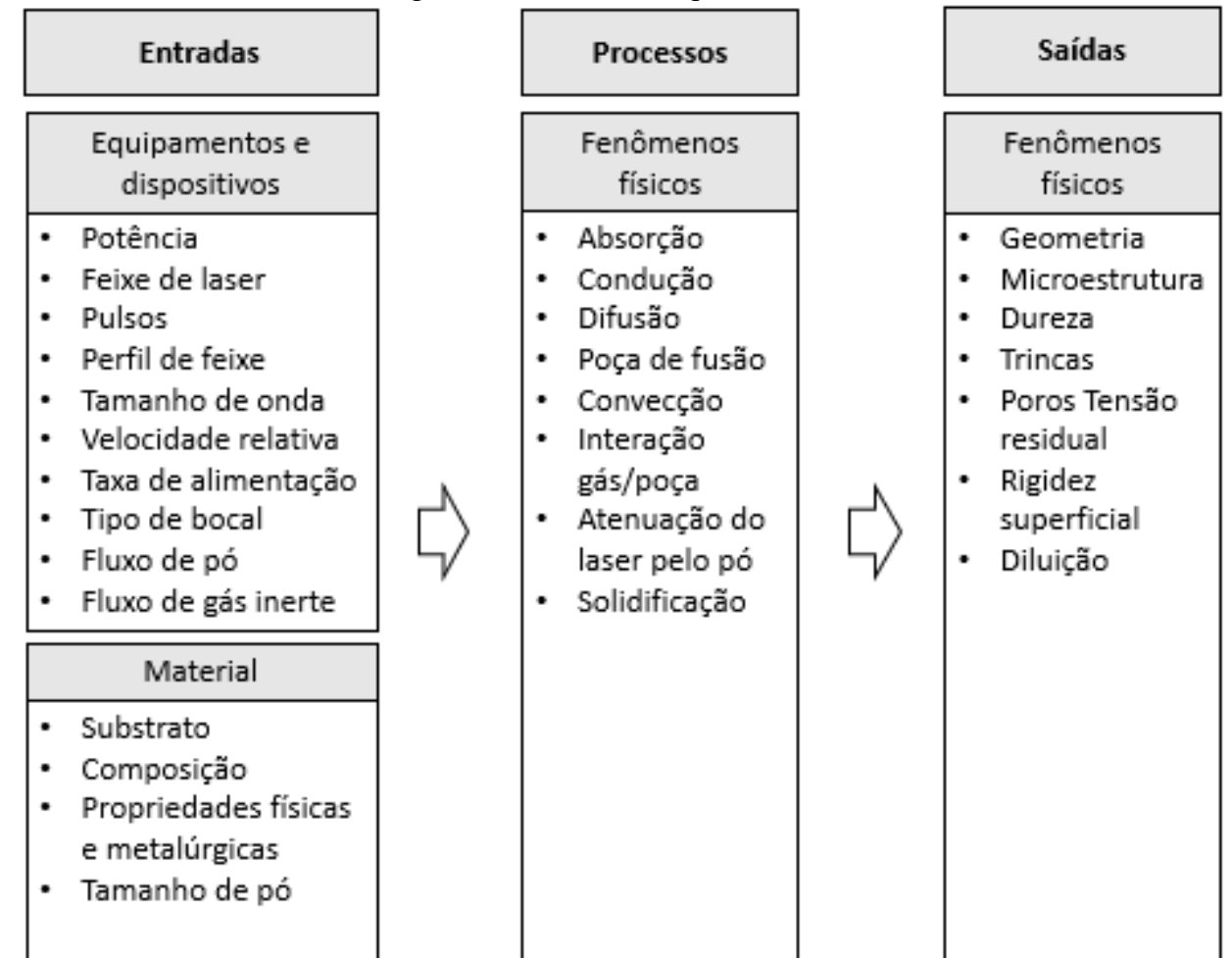


Fonte: O autor.

O resultado do processo de deposição de metais a laser depende de grande quantidade de variáveis. Como parâmetros de entrada, pode-se destacar os parâmetros de velocidade de deposição, potência do laser, vazão do material, vazão do gás de proteção e os parâmetros dos materiais, como a composição química do substrato e da liga de adição. Na Figura 6 é apresentado com mais detalhes um esquema dos parâmetros de processo físicos mais importantes para o processo.

Para realizar a deposição de metais a laser é necessário um estudo prévio de pesquisa para alguns desses parâmetros, onde deposita-se uma janela de parâmetros variando potência, velocidade e vazão do pó. Esta janela de processamento é feita geralmente, por fatorial completo de parâmetros e, ao final, tem-se um parâmetro de deposição estimado. Existem poucos estudos na literatura apresentando uma metodologia robusta de pesquisa de parâmetros, um deles é o trabalho Pacheco *et al*, (2021) elaboraram um modelo matemático para prever características geométricas de revestimento via Laser *cladding* usando uma superliga de cobalto sobre o AISI 316L como substrato.

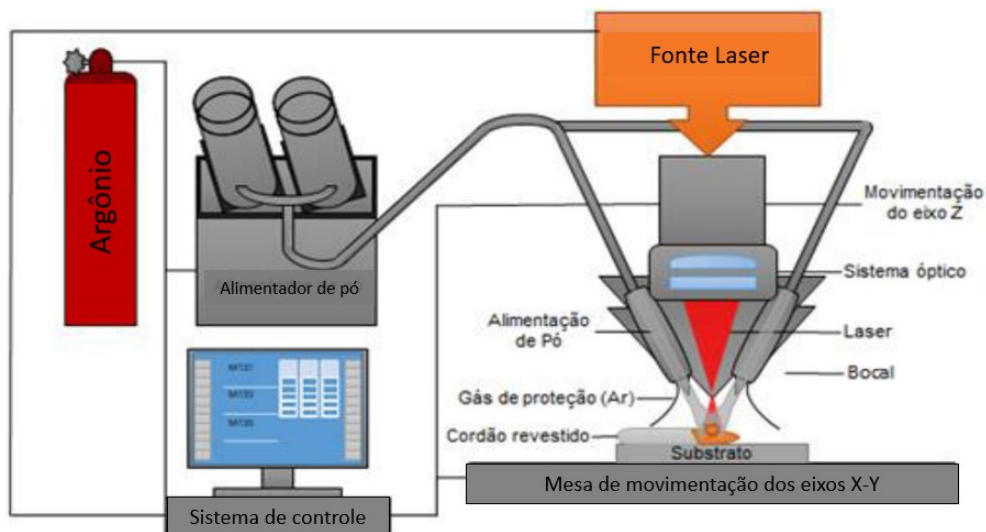
Figura 6: Parâmetros de processo.



Fonte: Adaptado de TOYSERKANI; KHAJEPOUR; CORBIN. (2017)

A respeito dos principais equipamentos envolvidos no processo, é mostrado um esquema simplificado na Figura 7. Para deposição metálica são imprescindíveis: uma fonte de calor, matéria prima, e uma condição ambiental controlada. No esquema ilustrado, estão representados os componentes encarregados de atender essas exigências, respectivamente a fonte de laser, o alimentador de pó metálico e o suprimento de gás de proteção. São necessários também o sistemas óptico que atua no direcionamento do feixe de laser e sistemas de movimentação é indispensável para dar geometria a deposição.

Figura 7: Esquema representativo do sistema de deposição.



Fonte: O autor.

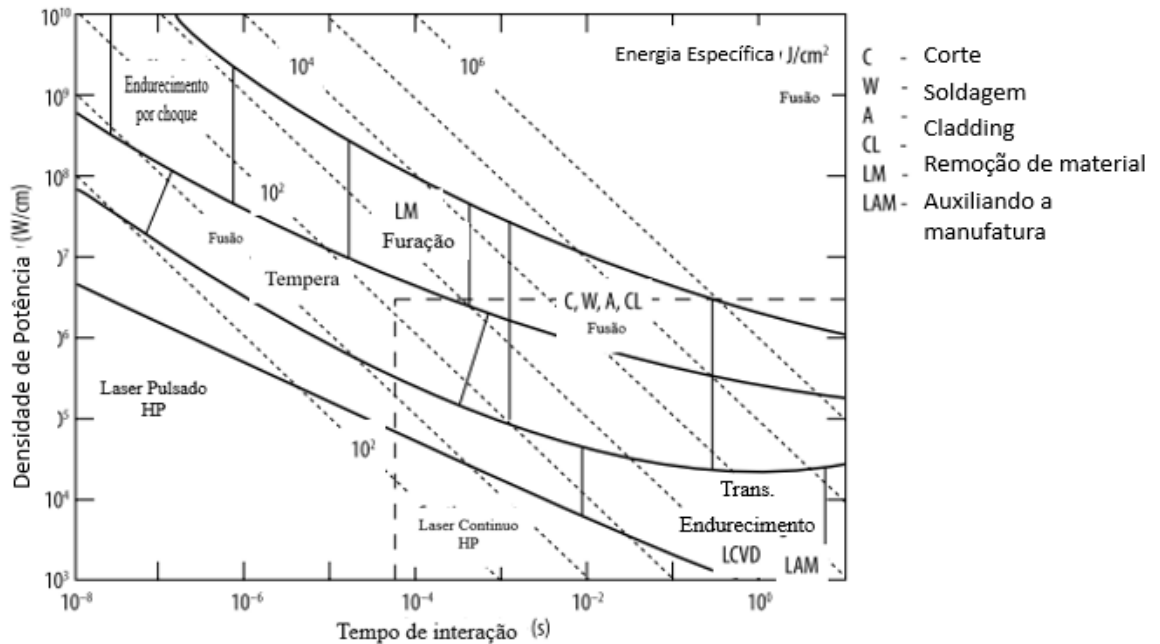
Nas seções seguintes são apresentados como os parâmetros e equipamentos apresentados influenciam nos princípios físicos envolvidos no processo. Bem como Algumas das aplicações envolvendo o processo de laser *cladding*.

2.4 FENÔMENOS FÍSICOS DO PROCESSO

O processo de interação entre o laser e os materiais do componente envolvem uma série de efeitos físicos, que são influenciados pelas propriedades dos mesmos. A influência mútua do laser com a matéria envolve a absorção da radiação seguida de rápida conversão em energia térmica. Dependendo da temperatura máxima atingida pelo metal, a qual é função da intensidade do laser e do tempo de interação com a região processada, os seguintes fenômenos podem ocorrer: aquecimento, fusão, vaporização ou remoção da matéria da região de interação como líquido ou plasma (GASSER, 1988).

Os processos de tratamento de superfície, onde a densidade de potência está entre 10^5 e 10^7 W/cm², exibem os fenômenos de convecção/transferência de momento como mais significativos, juntamente com o transporte de massa, o qual determina a microestrutura fora do equilíbrio e a composição do material solidificado. Na Figura 8 são apresentadas as densidades de potência características de diversas técnicas de processamento a laser e os fenômenos de transporte associados.

Figura 8: Regime operacionais de técnicas de processamento a laser.



Fonte: Adaptado pelo autor de Steen e Mazumder. (2010)

No processo de soldagem a arco, as forças que atuam durante o processo são: forças termo-capilares (ou de Marangoni), forças eletromagnéticas (ou de Lorenz), forças de empuxo (ingl. buoyancy) e forças aerodinâmicas de arraste. No processo laser *cladding* não há o efeito das forças eletromagnéticas, pois não há passagem de corrente elétrica na poça de fusão.

As forças de empuxo estão intimamente ligadas à de convecção natural e são causadas por diferenças de densidade em regiões de um fluido com temperaturas diferentes e se tornam maiores para quando a espessura da poça fundido é maior. Segundo Mills *et al.* (1998), é demandando maior análise em processos em que a espessura da poça é superior a 10 mm.

Forças aerodinâmicas de arrasto na superfície da poça fundida são decorrentes da ação do fluxo dos gases de proteção e arraste na região de processamento (MILLS *et al.*, 1998). Em processos a laser, as pressões podem chegar a 10^5 N/m², sendo significativa na determinação da superfície da poça fundida durante o processo de solidificação (LAWRENCE, 2010).

As forças de Marangoni são fluxos decorrentes de tensão superficial, identificados como principais responsáveis por correntes convectivas na poça fundida (STEEN; MAZUMDER, 2010; ION, 2005). E o número de Marangoni ou termocapilaridade representa

uma medida relativa entre as forças resultantes dos gradientes de tensão superficial e forças viscosas (VELARDE, 2002).

Os elevados gradientes de temperaturas exibidas na poça de fusão geram forças de correntes convectivas. Como consequência as fases líquidas se misturam rapidamente e se tornam homogêneas. Após o resfriamento a solidificação formada resulta em uma camada densa e com boa adesão (TOYSERKANI *et al.* 2017).

De acordo com Steen e Mazumder (2010) o fluxo de Marangoni pode causar mistura de materiais, ondulação na superfície, aumento da poça de fusão e mistura não homogênea de materiais de substrato com os materiais de revestimento. Além disso um aumento no número de Marangoni implica no aumento de calor levado a região lateral do cordão, em consequência a zona fundida se torna mais larga.

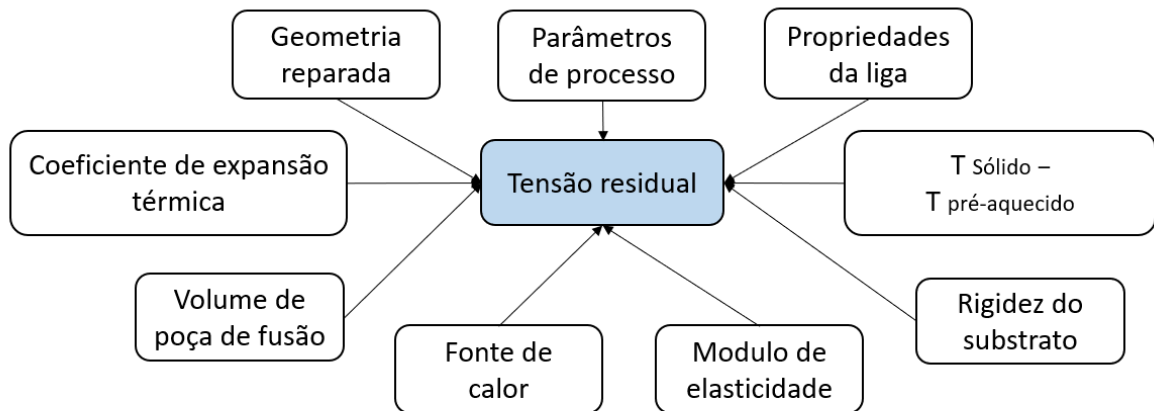
De modo que para o processamento de materiais a laser os fluxos convectivos induzidos por gradientes de tensão superficial característicos do efeito Marangoni constituem o fenômeno mais importante em termos de movimentação da poça fundida (STEEN; MAZUMDER, 2010; ION, 2005).

2.5 DISTORÇÃO E TENSÃO RESIDUAL

A tensão residual é uma variável significativa no condicionamento de componentes, especialmente em peças com controle dimensional crítico. Para ter tal controle é preciso mensurar e mitigar os efeitos provenientes dos ciclos de aquecimento e resfriamento do substrato. O substrato pode deformar em vários planos, tornando necessário etapas de pós-processamento afim de atender os requisitos dimensionais (ION, 2005).

Wu *et al* (2020) estuda a hierarquia de influência das variáveis de processo na tensão residual, para o processo de manufatura aditiva a arco elétrico (*wire-arc additive manufacturing* - WAAM). Utilizando técnicas de tratamento de dados orientado a *machine learning* para estabelecer relações entre as variáveis e predizer a tensão residual através de simulação. As variáveis de entrada consideradas são apresentadas na Figura 9. É verificado que mantendo o material, os parâmetros de maior influência são respectivamente, temperatura de pré-aquecimento, potência, espessura do substrato e velocidade de varredura.

Figura 9: Variáveis de entrada para tensão residual.



Fonte: O autor com base em WU *et al.* (2020)

Heigel, Michaleris e Palmer (2015) fizeram um monitoramento e caracterização da distorção em aplicação de revestimento de Inconel 625, variando a estratégia de deposição, potência e velocidade de varredura. Neste estudo são avaliados os perfis longitudinais e transversais ao cordão de distorção para duas camadas de revestimento. É verificado que a quantidade de calor linear não é suficiente para prever a distorção resultante, se propõe então a incorporação da distância interpases para calcular a densidade de energia na camada depositada. Foi observado também que a segunda camada depositada acresce o mínimo de distorção angular, enquanto o empenamento na longitudinal apresenta uma distorção semelhante a primeira camada.

As soluções tomadas como mais frequência para reduzir a tensão residual e deformações consequentes são, o pré-aquecimento do substrato ou de acordo com Ion (2005) essa redução pode ser mitigada com a redução da entrada de calor no processo, diminuindo a potência ou aumentando a velocidade de varredura do processo. Em casos extremos pode-se inclusive fazer uma pré-deformação mecânica para compensar o efeito durante o processo de revestimento.

2.6 APLICAÇÕES DE LASER *CLADDING*

O mercado de condicionamento de componentes de elevado valor agregado, usados nas indústrias como a de óleo e gás, aeronáutica estão entre as aplicações mais promissoras para

laser *cladding*. O custo envolvido em manter estes componentes ociosos à espera de substituição ou reparo é extremamente alto. De acordo Vendra e Achanta (2018), entre os grandes impulsionadores para aplicação de MA na indústria de óleo e gás estão, a redução de *lead time* e a substituição de componentes com a eliminação de ferramental e custos de inventário.

A técnica de laser *cladding* tem potencial de tornar-se umas principais ferramentas para esse tipo de conserto. A capacidade de automação e aplicação em campo mantendo a integridade do material de reparo são um grande diferencial. Embora os métodos convencionais como aspersão térmica, arco elétrico sejam utilizados no reparo, esses métodos estão propensos a apresentar pobre qualidade mecânica, trincas e porosidade, resultado em um ciclo de vida mais curto.

A fim de atender as demandas acima mencionadas, existem trabalhos que tentam preencher as lacunas de conhecimento. Brandt *et al.* (2009) avaliam a viabilidade de reparo *in situ* de turbinas de gás de AISI 314L com material de adição Stellite 6, com o intuito de reduzir *lead time* e custo em relação aos procedimentos convencionais. São avaliadas microestrutura, distorção, distorção e erosão. A utilização de um material com propriedades superiores contribui para que o equipamento opere por mais tempo sem a necessidade de usar um componente fabricado inteiramente de material nobre, para regiões menos solicitadas. O processo de reparo é mostrado na Figura 10.

Figura 10: Reparo em campo de turbina de gás.



Fonte: Brandt. (2009)

Schweitzer (2014) estuda a aplicação de laser *cladding* com injeção de pó, devido suas características de tratamento localizado e controle do material injetado. O processo se mostra particularmente apropriado devido a flexibilidade e baixos níveis de diluição. O autor compara duas técnicas de reparo: a primeira, na qual a camada superficial é toda removida; e a segunda com a remoção de pequenos volumes, e analisa como a microestrutura é afetada. De acordo com o autor, apesar de usar menor quantidade de material, a segunda estratégia pode gerar regiões mais suscetíveis a trincas devido às tensões residuais dadas pelas altas taxas de resfriamento.

A adição de um material com propriedades diferentes no reparo, amplia a janela de possibilidades. Song *et al.* (2016) afirmam que, uma vez que o componente teve uma falha localizada, este componente está predisposto a sofrer do mesmo problema após reparo, uma vez que a condição de operação é a mesma. Assim sendo a utilização de pós metálicos com propriedades superiores se torna indicada para prologar a vida útil do componente.

Alguns dos trabalhos realizados com foco em revestimento e reparo via laser *cladding* são mostrados na Tabela 6, sendo aplicados em diversas frentes da indústria e com vários materiais, evidenciando grande diversidade nas áreas aplicação desta tecnologia.

Tabela 6: Aplicação de Laser *cladding*.

Setor da Indústria	Componente	Material	Referência
Automotivo	Sede da válvula	Cobre	(Belforte, 1994)
	Sede da válvula	Ni-Cr-B-Si e Co-Cr-W	(Aihua et al., 1991)
Aeroespacial	Sede da válvula	Stellite	(Küpper, et al., 1990)
	Ferramenta de moldagem por injeção	Aço ferramenta P20	(Morgan, 2001)
	Palheta de turbina	Stellite	(Macintyre, 1983a, b, c; Duhamel et al., 1986; Merchant, 2002)
Maquinário	Palheta de turbina	Liga de Níquel	(Ritter et al., 1992)
	Vários	Ligas de Titânio	(Arcella and Froes, 2000)
	Palheta de Compressor	Ni-Cr	(König et al., 1992)
	Lâminas de arado	Stellite 6	(Bruck, 1987)
Petróleo e Gás	Ferramenta de deformação	Stellite 6	(van de Haar and Molian, 1987)
	Lâminas de corte	Stellite	(Ion et al., 1999)
	Modificação de ferramental	Aço ferramenta P20	(Morgan, 2001)
	Brocas	Base de ferro	(Semionov, 1989)
	Bucha da bomba	Liga-WC	(Blake and Eboo, 1985)
	Parafuso extrusora	Alumínio bronze	(Wolf and Volz, 1995)
	Brocas	Stellites e Colmonoys	(Eboo and Lindemanis, 1985)
Geração de Energia	Válvulas	Stellite 6	(Koshy, 1985)
	Peças de turbina a gás	Inconel 718	(Mehta et al., 1985)
Construção Naval	Palheta de turbina	Base de Cobalto	(Regis et al., 1990)
	Palheta de turbina	Stellite	(Alam and Ion, 2002)

Fonte: Adaptado de Ion. (2005)

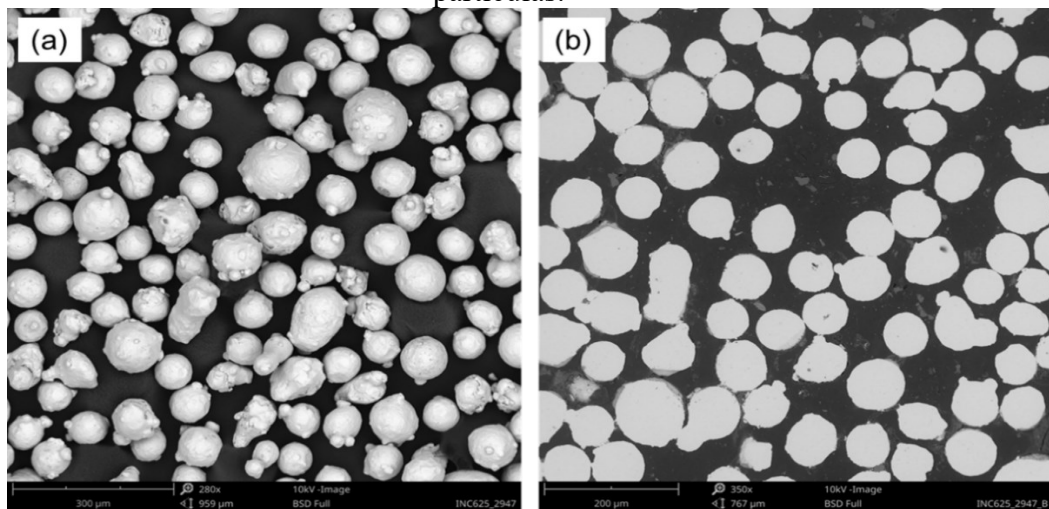
Este processo traz novas oportunidades para fabricação e reparo de revestimentos metálicos, devido as suas características intrínsecas: não há contato da ferramenta no substrato, preservando a ferramenta; possui a capacidade de processar materiais convencionalmente difíceis de serem trabalhados; possibilidade de tratar regiões discretas de componentes grandes;

tratamento preciso de pequenos componentes; tratamento de áreas selecionadas; acessibilidade do feixe laser em locais de difícil acesso (ION, 2005).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O material de adição utilizado nesta pesquisa é o Inconel 625 atomizado a gás pela fabricante Höganäs, com diâmetro nominal das partículas é de 45-145 μm . O pó foi caracterizado via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), através do equipamento Zeiss SUPRA 55 VP, a fim de avaliar a morfologia e presença de defeitos. Na Figura 11 (a) verifica-se a presença de partículas, em sua maioria esféricas, entretanto com algumas partículas alongadas. É visível a presença de partículas satélites em praticamente todas as partículas maiores. Estas partículas satélites possuem cerca de 10 – 15 μm e em excesso, podem ser causadores de defeitos de deposição; e em (b) é mostrado a seção transversal do pó metálico, onde é possível notar a presença de pequenos poros em algumas partículas. Entretanto, pelo tamanho dos poros e pela maioria das partículas apresentarem altas densidades, não deverá ocasionar nenhum tipo de problema de deposição.

Figura 11: (a) Partículas da liga Inconel 625 atomizado a gás; (b) seção transversal das partículas.



Fonte: O autor.

Na Tabela 7 é possível verificar a composição química fornecida pelo fabricante do pó metálico e do substrato de AISI 316L.

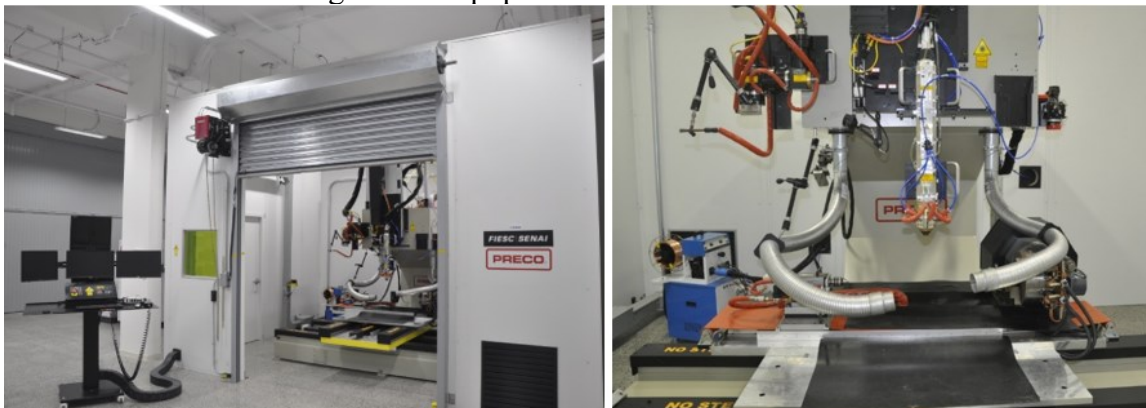
Tabela 7: Composições químicas fornecidas pelo fabricante.

Material	Ni	Cr	Fe	C	Mn	Mo	Si
Inconel 625	Bal	21,6	0,70	0,01	0,40	8,90	0,44
AISI 316L	10,88	16,38	Bal	0,02	1,22	2,30	0,50

Fonte: O autor.

Para realização do experimento, foi utilizado uma fonte de Diodo da fabricante Laserline, modelo LDF6000-60VGP com potência máxima de 6000 [W] e com unidade CNC de 5 eixos da fabricante Preco modelo SL 8600 e o bocal Fraunhofer Coax 8.

Figura 12: Equipamento PRECO SL 8600.



Fonte: O autor.

Os parâmetros de processo usados para realização dos experimentos são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Parâmetros do equipamento usados no processo.

Tipo de laser	Laser de diodo
Comprimento de onda [nm]	980 – 1060
Diâmetro do feixe laser [mm]	2
Distância de trabalho [mm]	213
Gás de proteção [L/min]	Argônio, 8

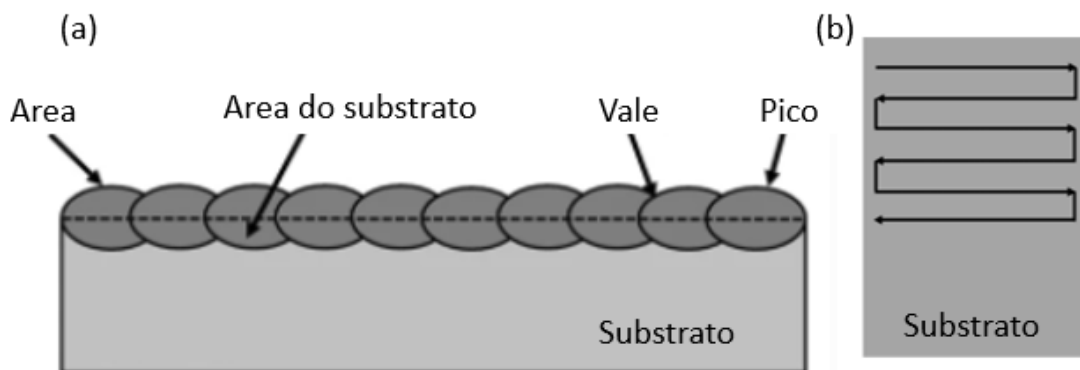
Gás de arraste [L/min]	Argônio, 8
-------------------------------	------------

Fonte: O autor.

Foram conduzidos experimentos preliminares para determinar os parâmetros operacionais de maior influência nas características geométricas e propriedades físicas dos cordões depositados. Segundo Zanarin (2015), a qualidade e as propriedades de um revestimento por laser *cladding* podem ser determinadas por uma variedade de fatores, como a geometria do cordão, microestrutura, diluição, presença de defeitos, tensão residual, distorções, dureza superficial, mudanças metalúrgicas no substrato e eficiência do processo. Destacando como parâmetros operacionais mais importantes, é possível citar a potência do laser [W], velocidade de deposição [mm/min], taxa de alimentação [g/min], sobreposição [%] e estratégia de deposição.

Os experimentos iniciais consistem em um design de experimentos (Design of Experiment -DOE), usando a metodologia descrita por (PACHECO *et al.*, 2021), que consideram os parâmetros geométricos mostrados na Figura 13 (a) e estratégia de deposição em Zig-Zag, como mostrado na Figura 13(b).

Figura 13: Estratégia de deposição no DOE.



Fonte: O autor com base em Pacheco *et al.* (2021)

Uma tabela com os parâmetros utilizados encontra-se no apêndice A. Bem como as superfícies de resposta provenientes desses parâmetros que são mostradas em apêndice B. Para escolher o parâmetro utilizado nos experimentos foi usado a predição pelo modelo matemático de regressão com objetivo de obter como parâmetros de saída uma geometria que respeite as faixas de parâmetros mostrados na Tabela 9.

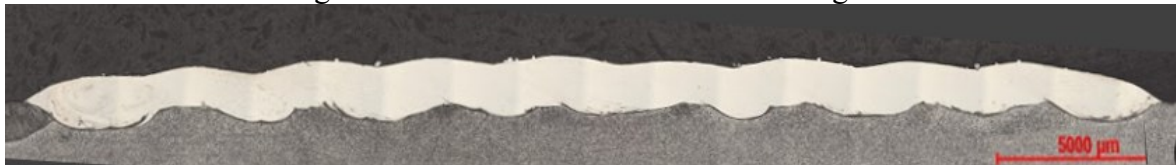
Tabela 9: Parâmetros de saída desejados.

Parâmetro	Objetivo	Obtido teórico
Altura [mm]	Maximizar	0,5
Diluição [%]	Minimizar	8,0
Ondulação [mm]	Minimizar	0,1
Descontinuidade	Minimizar	0,0

Fonte: O autor.

Os valores obtidos teóricos são derivados da regressão numérico, e o objetivo são as inclinações desejadas para os parâmetros geométricos. Na Figura 14, é mostrado a imagem da seção transversal, junto com os parâmetros resultante da modelagem e que foram utilizados para fabricações posteriormente.

Figura 14: Parâmetro resultante da modelagem.

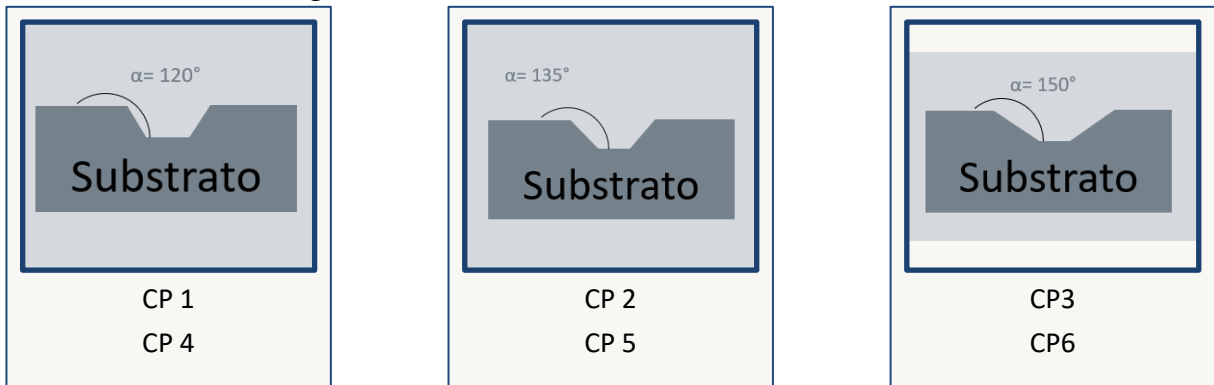


Potência	Velocidade	Distância entre cordões	Vazão pó	Vazão Argônio
651 W	501 mm/min	1,1 mm	8 g/mim	16 l/min

Fonte: O autor.

Após definidos os parâmetros de processamento, foram selecionados substratos de aço AISI 316L com dimensões 95 x 74 x 15,88 mm. Os substratos foram fresados com o ângulo α de chanfro, o qual foram usados os valores de 120°, 135° e 150° como mostra Figura 15. A profundidade do chanfro foi de 5 mm e a largura da raiz 10 mm. Para atestar a repetibilidade do processo foi feito uma réplica para cada parâmetro e identificadas com numeração conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15: Vista transversal dos substratos fresados

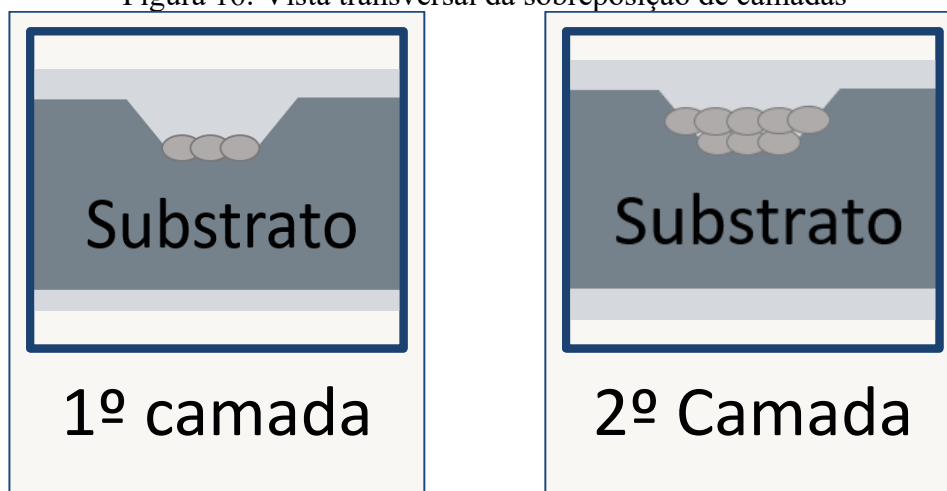


Fonte: O autor.

Os corpos de prova (CPs) foram jateados com granalha de aço para evitar a reflexão do feixe de laser, identificados numericamente e quanto a posição de referência, para então serem inspecionados geometricamente com uso do braço FARO. Os substratos foram identificados com a direção da coordenada xy, para ser usado como referência na comparação após componentes reparados.

O procedimento de deposição foi realizado com a mesma estratégia em Zig-Zag utilizada no DOE. A cada camada foi depositada se aguardou por 3 minutos, para que o substrato tenha a sua temperatura homogeneizada. As camadas foram depositadas de forma sobreposta, onde aumento da área na progressão das camadas foi compensado pelo aumento do número de linhas, uma representação é mostrada na Figura 16.

Figura 16: Vista transversal da sobreposição de camadas



Fonte: O autor.

As deposições foram feitas com substrato a temperatura ambiente e sem atmosfera controlada. A Figura 17 mostra a deposição da camada final em um dos substratos. Nesta é possível ver as marcações do eixo coordenado usado para referências de posição nos processos de deposição e inspeção geométrica.

Figura 17: Deposição do reparo.



Fonte: O autor.

Após as deposições os CPs foram submetidos novamente as medições no braço Faro, com intuito de gerar uma superfície a partir da nuvem de pontos e comparar com a superfície inicial gerando perfis de distorção não direções x-y indicadas nos CPs, esses dados são tratados pelo software Geomegic control®. O operador seleciona 3 pontos e um eixo coordenado para referenciar o modelo em cada CP, então o software faz um ajuste entre a nuvem de pontos pré-revestimento e o modelo revestido. A comparação entre os modelos é feita por uma subtração dos pontos coordenados, e os resultados representam a magnitude do vetor resultante.

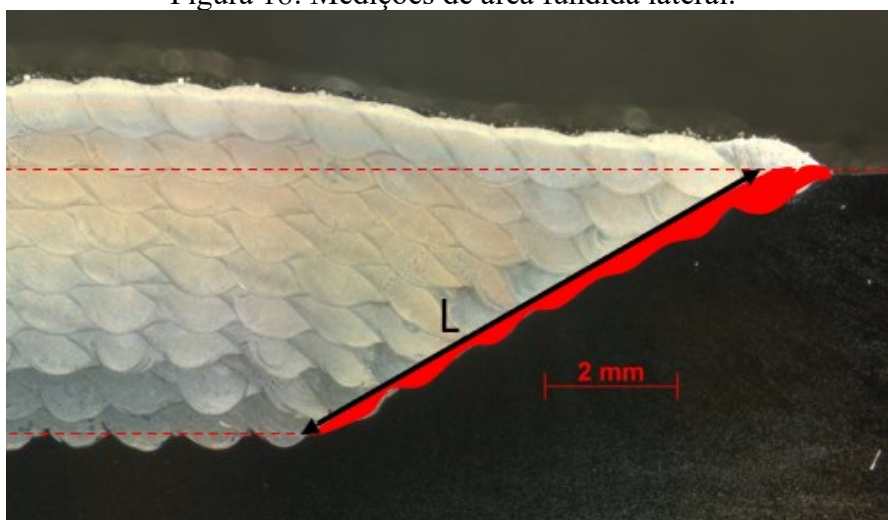
A fim de conduzir as análises na secção transversal dos substratos preenchidos, os CPs foram cortados ao meio por serra fita, posteriormente seccionado com uso da *cut-off* e as seções transversais foram preparadas metalograficamente para avaliação microestrutural por microscopia ótica. Para revelar a microestrutura as amostras foram submetidas a ataque eletrolítico com a solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 2% em água e usa tensão de 2,8 V por aproximadamente 5s. A avaliação da microestrutura foi realizada com o MEV e as análises de

composição química foram conduzidas por meio de EDS (*Energy-dispersive X-ray spectroscopy*).

A ligação entre material de adição e substrato foi avaliada por meio de medições da área fundida do substrato, usando o software imageJ. Com intuito de manter uma coerência dimensional entre os diferentes ângulos de chanfro, se optou por medir a área que ultrapassar a margem delimitada no processo de usinagem, desprezando a área acima do limite do substrato e dividindo pelo que comprimento do plano inclinado do chanfro.

Na Figura 18 é mostrado um exemplo da área medida, onde L é o comprimento e em vermelho a área considerada na obtenção da área fundida. O procedimento é repetido nas duas laterais do reparo, os resultados apresentados são a média aritmética entre os lados.

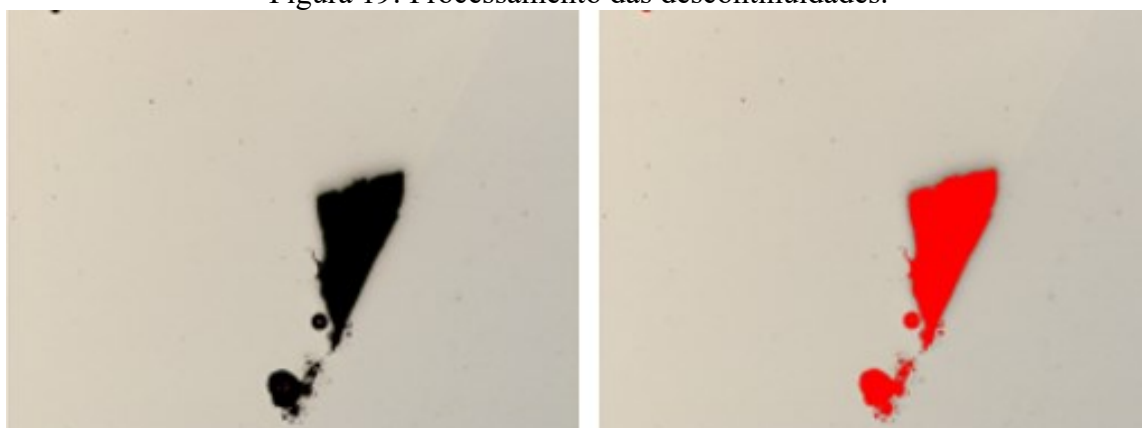
Figura 18: Medições de área fundida lateral.



Fonte: O autor.

A contabilização de discontinuidades foi feita com Microscópio *Carl Zeiss*, usando o módulo de contabilização de fases. A Figura 19 mostra o processamento de uma das imagens captadas, o programa conta o número de manifestações de discontinuidade, separa as em classes e calcula a área percentual representada em cada uma da série de imagens. Para as três condições de chanfro foram registradas imagens ao longo de todo o perfil transversal de deposição.

Figura 19: Processamento das descontinuidades.



Fonte: O autor.

Para medição de microdureza Vickers, foi usado uma carga de 500 gramas e tempo de 10 s de espera entre as endentações, usando um espaçamento de 0,3 mm. As medidas foram tomadas nas regiões centrais dos reparos e nas regiões laterais, onde a ligação entre substrato e material de adição no plano inclinado dos chanfros. Em ambos foram feitas medida até que fosse possível distinguir a transição entre o Inconel 625 e o AISI 316L, sendo realizadas ao menos 3 medições no substrato.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os experimentos foram realizados no Instituto SENAI de Inovação em Processamento a Laser, com os procedimentos descritos no capítulo 3. E para avaliar a qualidade dos reparos para diferentes ângulos, os resultados foram divididos nos seguintes grupos: distorção geométrica, morfologia, microestrutura e micro dureza.

4.1 DISTORÇÃO GEOMÉTRICA

O resultado da distorção pelo processo de reparo via laser *cladding* é uma composição entre os efeitos da distorção longitudinal e a distorção da transversal, o que torna muito difícil de distinguir os efeitos de cada modo de distorção em um caso de reparo.

Foi verificado que o sistema de medição ajusta o corpo mensurado de forma global. Dificultando uma análise quantitativa precisa, uma vez que as distorções apresentadas, não tomam a mesma referência de direção de distorção.

A distorção dos componentes é derivada principalmente dos elevados gradientes de temperatura e do resfriamento rápido inerente de processos de L-DED (HE *et al.*, 2019). O foco das análises é dado aos efeitos globais e nas variações observadas com a mudança do chanfro, buscando identificar e relações físicas que expliquem os efeitos.

Os parâmetros de deposição permanecem constantes ao longo de todo o experimento, logo a densidade de energia é a mesma para todos os ângulos de chanfro. No entanto, apesar da temperatura inicial dos experimentos ser a mesma, a quantidade de energia depositada varia com o volume a ser preenchido, conforme dados mostrados na Tabela 10.

Tabela 10: Energia aportada ao CP.

CP	Energia Fornecida	
1 e 4	187,48	kJ
2 e 5	249,98	kJ
3 e 6	312,48	kJ

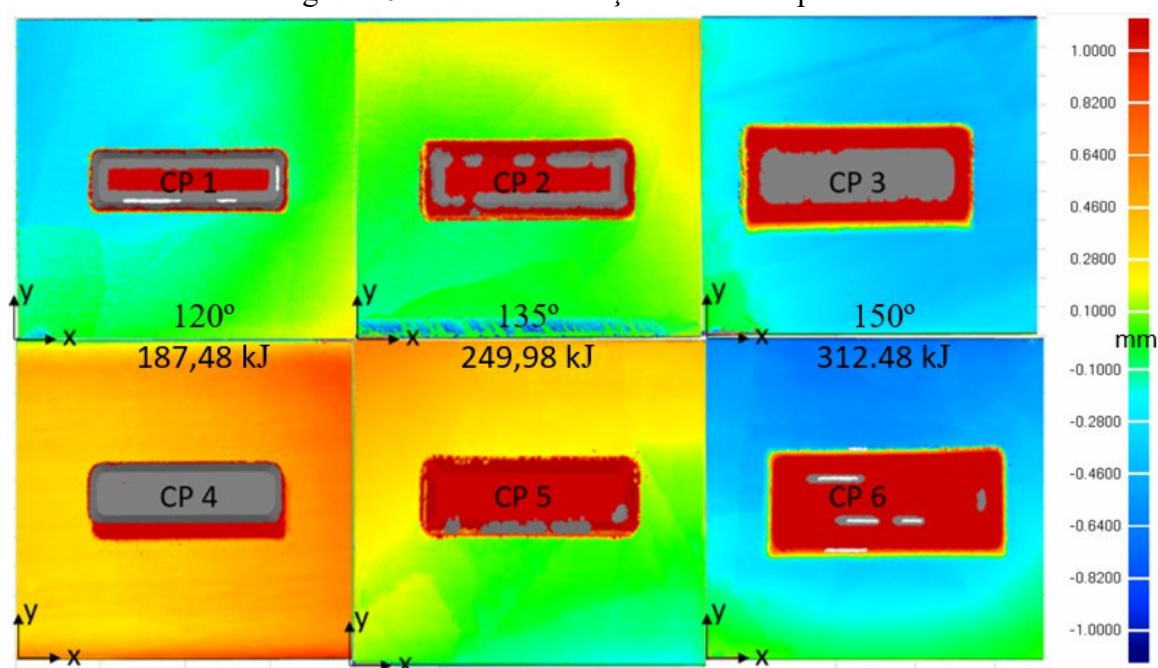
Fonte: O autor.

A variação de energia aportada tem influência direta na distorção, de modo que para os CPs com maior energia fornecida é esperado maiores distorções. Tal como, é esperado que

a influência seja mais proeminente no eixo y, ao passo que a taxa de resfriamento tende a ser maior nesta direção, na qual o material de adição tem contato com uma área maior do substrato.

Na Figura 20 é apresentada uma composição com os gradientes de distorção para os CPs avaliados. Os vetores de maior magnitude são os do canto superior direito, sendo está a região mais distante da origem que é tomada como referência. Foi observado que, em todos os Cps, os gradientes de cores indicam uma variação maior que 0,2 mm na direção y, sendo esta direção a que apresenta variações mais intensas de cores.

Figura 20: Perfis de distorção na vista superior.

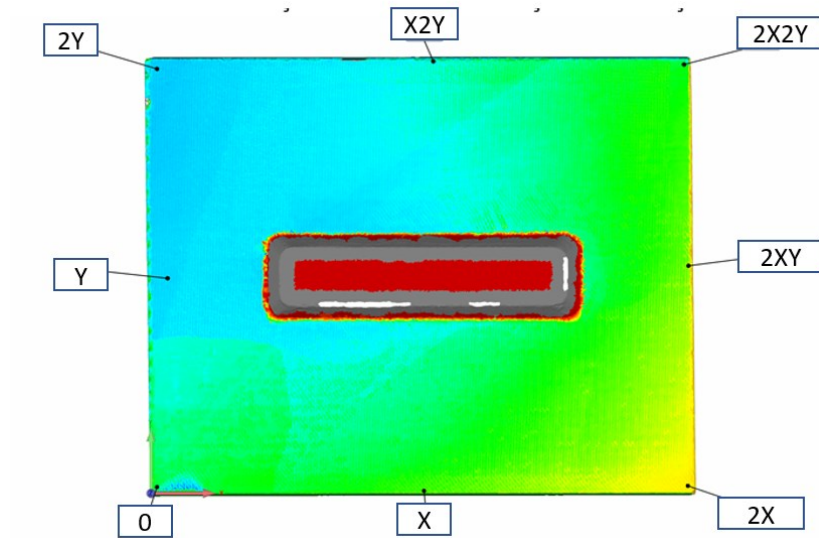


Fonte: O autor.

Para atribuir valores as distorções, foram realizadas medições em 8 pontos dos CPs, identificados na Figura 21, os resultados foram modularizados para melhor visualização. Contudo, os relatórios de distorção não mostram uma tendência clara com relação a direção, embora seja possível notar um aumento de distorção em módulo com o aumento de chanfro.

Considerando a soma do desvio nos pontos analisados, é apresentado na Figura 22, as amplitudes pontuais de cada um dos ângulos de chanfro. Onde temos um aumento no módulo das somas das distorções com o aumento de energia fornecida e do ângulo de chanfro.

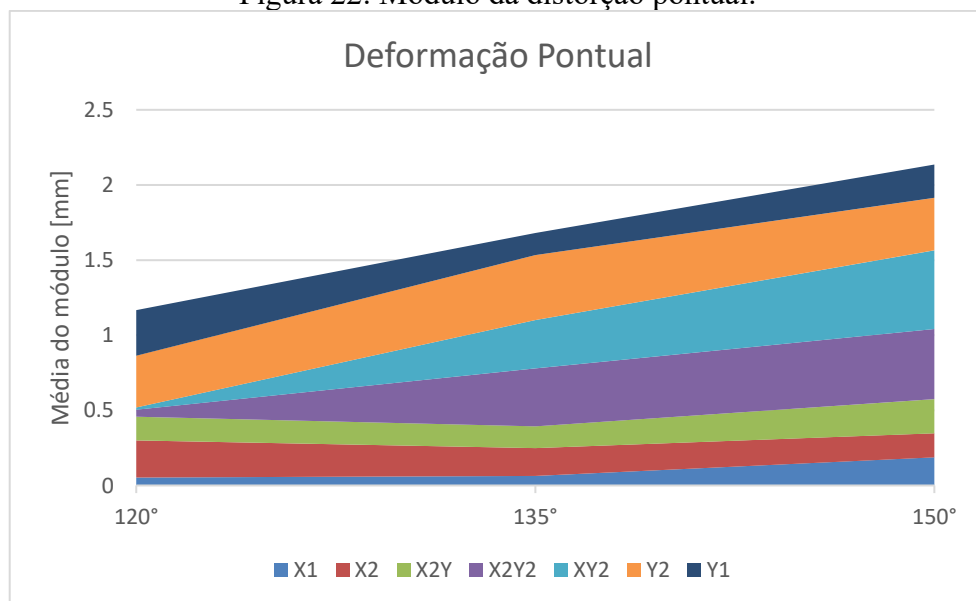
Figura 21: Pontos de distorção característico.



Fonte: O autor.

Ao usar como referência a distorção o ângulo de 120° , foi observado uma média das somas entre os CPs 1 e 4 de 1,23 mm, considerando os pontos mostrados na Figura 21. Na Figura 22 o módulo da distorção para cada um dos pontos medidos no eixo das coordenadas e a soma para cada inclinação de chanfros no eixo das abscissas. Além disso, é possível identificar que as variações no eixo y são maiores em módulo, corroborando com a análise visual dos gradientes de cores.

Figura 22: Módulo da distorção pontual.



Fonte: O autor.

É possível constatar que a grandeza de distorção para os experimentos no perfil longitudinal ficou abaixo de 1 mm, tendo uma forte correlação com o calor fornecido. Uma maior distorção foi observada nos CPS que foram submetidos a maiores picos de energia, o que causa uma maior tensão residual térmica e conseqüentemente distorções na rede cristalográfica do material. Assim, observa-se valores superiores de distorção em módulo.

Desta forma foi observado que para o CP 3 encontram-se os maiores valores absolutos de distorção. Apesar do gradiente de temperatura e resfriamento serem considerados parâmetro muito importante para determinação da distorção no processo utilizado, no experimento realizado não é possível tirar conclusões a respeito das correlações com a distorção. Isso é dado pela dificuldade de mensurá-los.

4.2 VALIAÇÃO DOS DEFEITOS MORFOLÓGICOS DA DEPOSIÇÃO

A metalografia foi o método para avaliar porosidade, presença de trincas e microestrutura das amostras usadas no experimento. Das imagens feitas por microscopia ótica, verificou-se que, as deposições têm preenchimento da zona reparada maior 99,6% para todas as condições depositadas, onde os principais defeitos contabilizados são: falta de fusão e porosidade. Porosidade pode ser definido como vazios na camada de revestimento ou entre linhas adjacentes (SCHWEITZER, 2014). Os poros podem ter origem durante o processo, como por exemplo através do gás de proteção, impurezas na superfície ou até mesmo reações químicas decorrentes do processo, formando bolhas que ficam retidas na poça de fusão. A porosidade também pode ser correlacionada com a qualidade do pó depositado, bem como com parâmetros de processamento. Sabe-se que partículas muito irregulares, com excesso de partículas satélites e até porosidade interna, são responsáveis por causar poros na camada. Além disso, parâmetros de processo influenciam diretamente na homogeneidade do cordão, podendo afetar também na formação de poros na camada.

Na contabilização de descontinuidades do perfil transversal, feita em microscópio ótico, as regiões apresentaram os valores de (0,09 %, 0,22 %, 0,39%) para os ângulos de chanfro de 150°, 135° e 120° respectivamente. Um resumo com as distribuições de descontinuidade encontrado em cada classe de tamanho em μm^2 é mostrado na Tabela 11. Dado os valores

apresentados, o CP 3 foi selecionado para avaliações na microestrutura, pois este apresentou resultados melhores para porosidade e falta de fusão.

Tabela 11: Percentual de descontinuidades.

	<10,00	10,0 - 12,5	12,5 - 15,0	15,0 - 17,5	17,5 - 20,0	>=20	Objetos contados	Área Percentual [%]
Cp1	92,56	1,33	1,82	1,33	0,67	2,31	605	0,39
Cp2	94,55	1,63	0,56	0,50	0,32	2,44	1596	0,22
Cp3	88,69	2,14	2,14	0,31	0,61	6,12	327	0,09

Fonte: O autor.

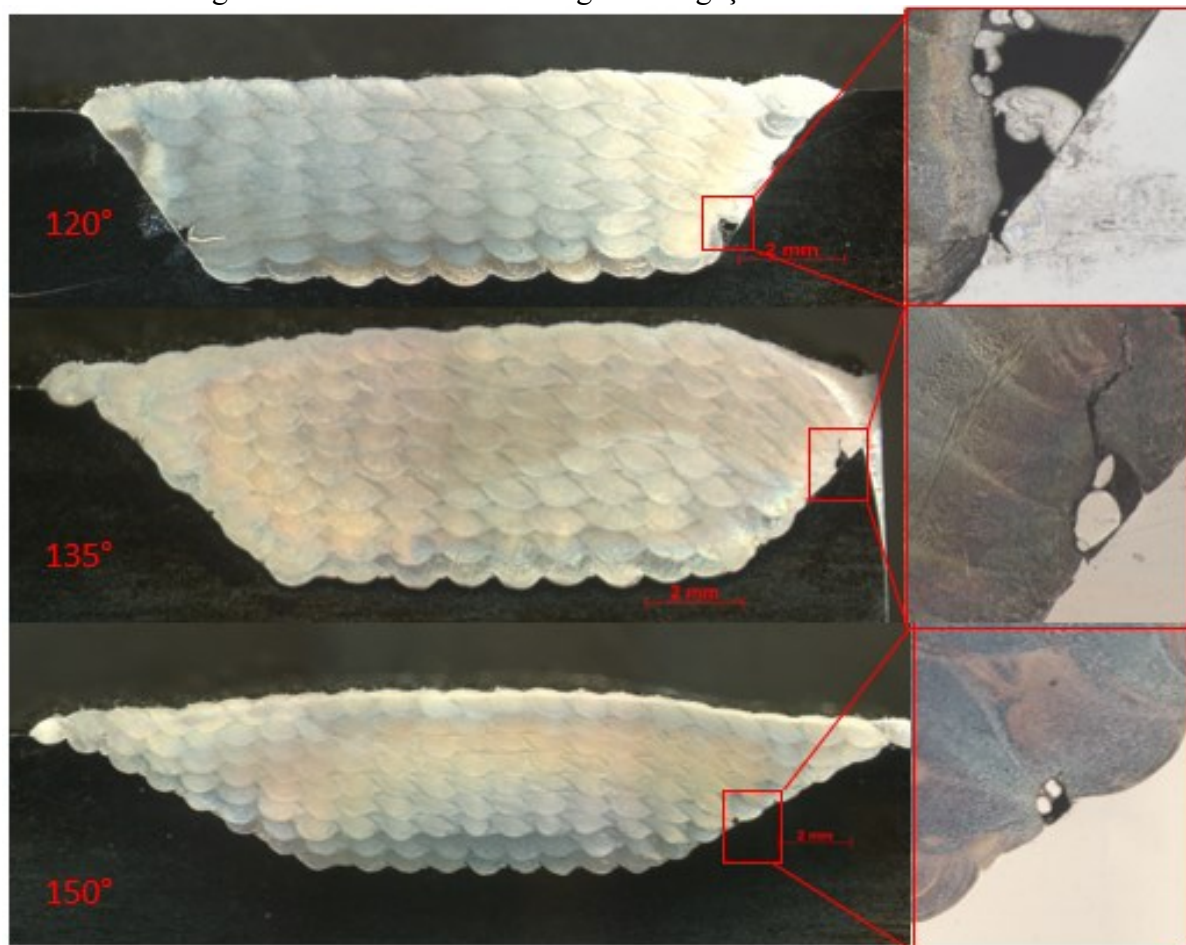
Com os resultados é possível perceber uma tendência. Ângulos mais agudos de deposição são mais propícios a formação descontinuidades por falta de fusão. Isto fica evidenciado pelo baixo percentual em número na classe maior que 20 μm^2 , a área de descontinuidade é sensivelmente maior para o CP 1.

Na Figura 23 são mostradas imagens de estereoscópio das seções transversais para as três condições avaliadas. Na mesma figura, a coluna da direita apresenta a falta de fusão na região de ligação, entre substrato e material de adição, com uma ampliação de 500 vezes registradas pelo microscópio ótico. Com estas imagens é possível observar partículas não fundidas ocupando a região de falta de fusão. Todas as três condições não apresentaram falta de fusão nas regiões de sobreposição de camadas na base do reparo, regiões consideradas críticas.

Da Figura 23 é possível notar uma tendência na redução da falta de fusão com o aumento do ângulo do chanfro, corroborando os resultados das medições de descontinuidades. A falta de fusão é um fator de concentração de tensão, que contribui para formação e propagação de trincas. Elas são observadas com maior frequência na região de sobreposição dos cordões.

De acordo com ION (2005), uma redução na taxa de alimentação permite que o material fundido flua para região de descontinuidade, aumentando a diluição e formando uma região íntegra. Uma alternativa é a adoção de uma estratégia de deposição diferente da adotada.

Figura 23: Falta de fusão na região de ligação com metal de base.



Fonte: O autor.

Ao variar a inclinação do chanfro, a área fundida do material de adição na superfície é afetada. Das medições feitas, conforme ilustrado na Figura 18, temos os valores de 0,052; 0,081; 0,097 [mm^2/mm] para área fundida no comprimento inclinado dos ângulos 120°, 135° e 150° de respectivamente.

Na Figura 24 é mostrado que com superfícies menos inclinadas, tem-se uma maior área fundida do metal de adição no substrato. Isso é decorrente de uma incidência maior da fonte de calor na superfície e do gradiente de temperatura local. Ao passo que mais energia é fornecida ao corpo de prova como no caso do CP 3, há uma homogeneização da temperatura do substrato. Enquanto para o CP 1 o gradiente térmico tende a ser maior devido a dissipação de calor local.

Figura 24: Área fundida na superfície lateral do reparo.



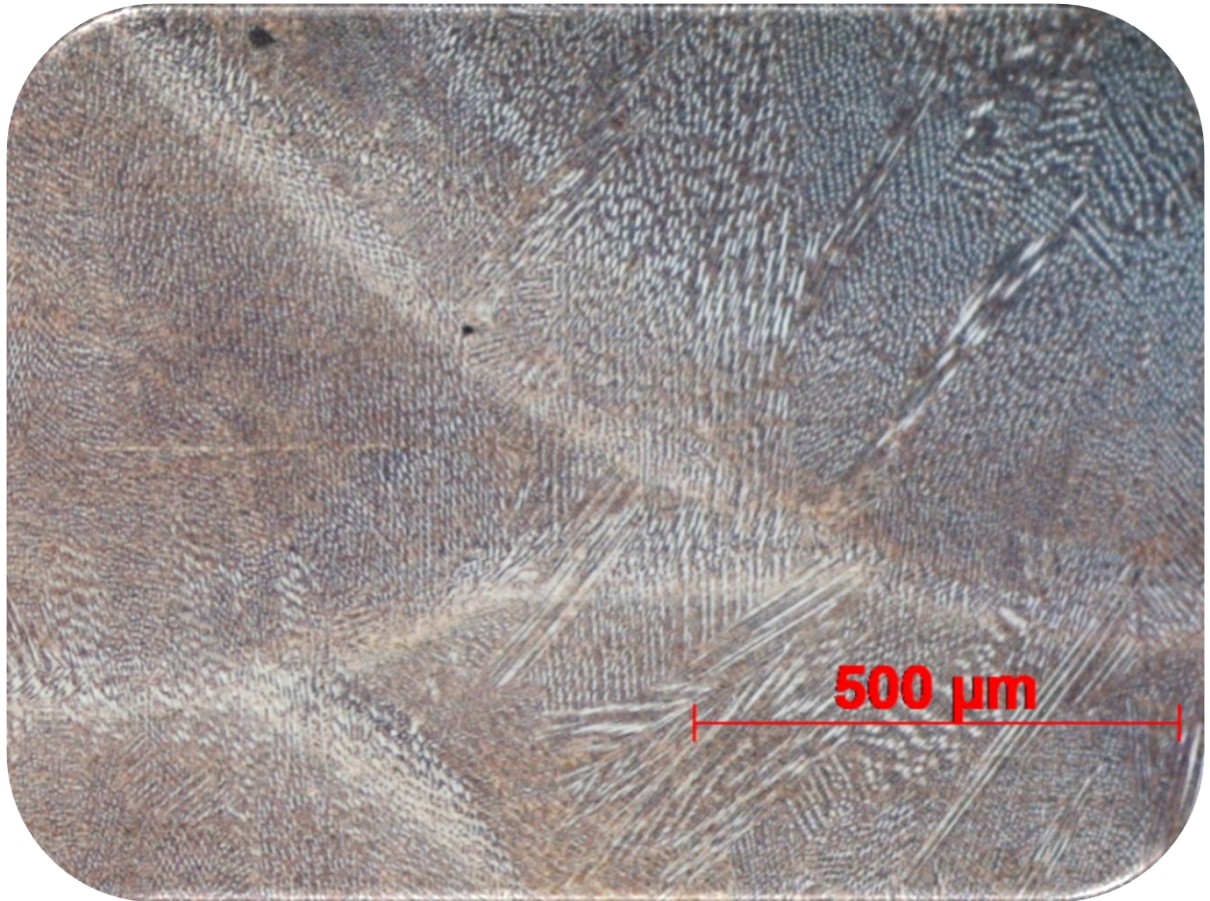
Fonte: O autor.

Com base na análise morfológica do reparo, observou-se que o ângulo se tem uma maior distorção no substrato devido as tensões térmicas, menor incidência de porosidade e poucos pontos com falta de fusão. É observado também que a região fundida maior aconteceu com ângulo de chanfro maior devido ao efeito Marangoni. Em virtude destas características, principalmente a ausência de regiões com falta de fusão, os demais experimentos microestruturais serão direcionados para os CPs confeccionados com o ângulo de chanfro de 150 °.

4.3 MICROESTRUTURA

Baseado nos resultados obtidos no capítulo anterior, as caracterizações microestruturais foram realizadas somente no CP3, com maior ângulo de chanfro. Nas regiões centrais da seção transversal foi verificado para todas as condições de deposição, uma microestrutura preferencialmente dendrítica do tipo equiaxial, com crescimento de algumas estruturas dendríticas colunares como mostrado na Figura 25. O crescimento equiaxial é observado de forma mais proeminente na região central de cada cordão. Onde as condições de elevada taxa de crescimento e menores gradiente de temperatura, induzem a formação de estrutura dendríticas equiaxiais. Não há presença de trincas e poros nessa região, indicando que o material tem uma boa processabilidade e que a janela de parâmetros escolhida é adequada.

Figura 25: Microestrutura na deposição do CP 3.



Fonte: O autor.

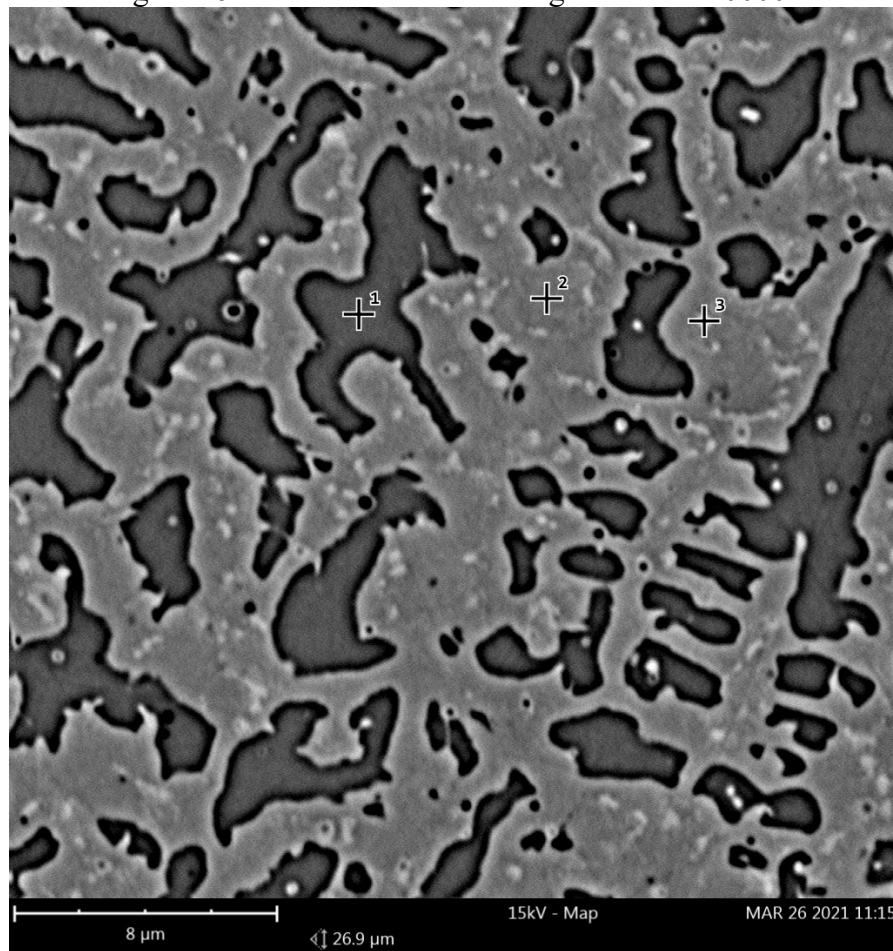
O Inconel 625 é constituído majoritariamente pela matriz austenítica (γ), com fase intermetálicas e assim como a presença de carbonetos (TUMER; KARAHAN; MERT, 2019).

Para identificar as a composição de fase do material, foi conduzido análises no microscópio eletrônico de varredura (MEV) na seção transversal, onde se realizou a medição de composição química via *Energy-dispersive X-ray spectroscopy* (EDS) em 3 pontos na região central da deposição.

A microestrutura é mostrada na

Figura 26. Com base nos resultados de análise de composição química, pode verificar que a fase mais escura é proveniente da solidificação L- γ primária, que causa microsegregação de elementos refratários como o Nb e o Mo.

Figura 26: Microestrutura MEV região central 10000x



Fonte: O autor.

De acordo com Chen *et al* (2016), o Ni e Fe solidificam preferencialmente com as dendritas, enquanto o Nb e Mo tem menor mobilidade e são isolados para o interdendrítico. Esse tipo de concentração na região interdendrítica é propício para formação de fases laves. Na região cinza claro a composição é muito semelhante a matriz γ , podendo ser a fase γ'' - Ni_3Nb com elementos como o Nb substituindo o Ni na estrutura tetragonal de corpo centrado.

As fases laves são definidas com uma proporção de (Fe+Cr+Ni, 64,4%) e (Nb +Mo+Ti, 35,6%), arranjadas como A2B formados por uma estrutura cristalina hexagonal (TUMER; KARAHAN; MERT, 2019). A natureza frágil das fases laves leva a uma baixa ductibilidade, resistência a fratura e propriedades a fadiga do material processado.

A Tabela 12 descreve as composições encontradas para os pontos destacado na

Figura 26. Não foi identificado Fe em composição significativa no centro do cordão, indicando que não houve grande diluição química, característica do processo de laser *cladding*, e as propriedades química e mecânicas do Inconel 625 foram preservadas.

Tabela 12: Composição química pontual

Ponto	Ni	Cr	Mo	Nb	Si
1	63,2%	21,0%	10,5%	4,7%	0,7%
2	60,5%	20,8%	11,2%	6,7%	0,9%
3	51,9%	19,2%	10,7%	17,4%	0,9%

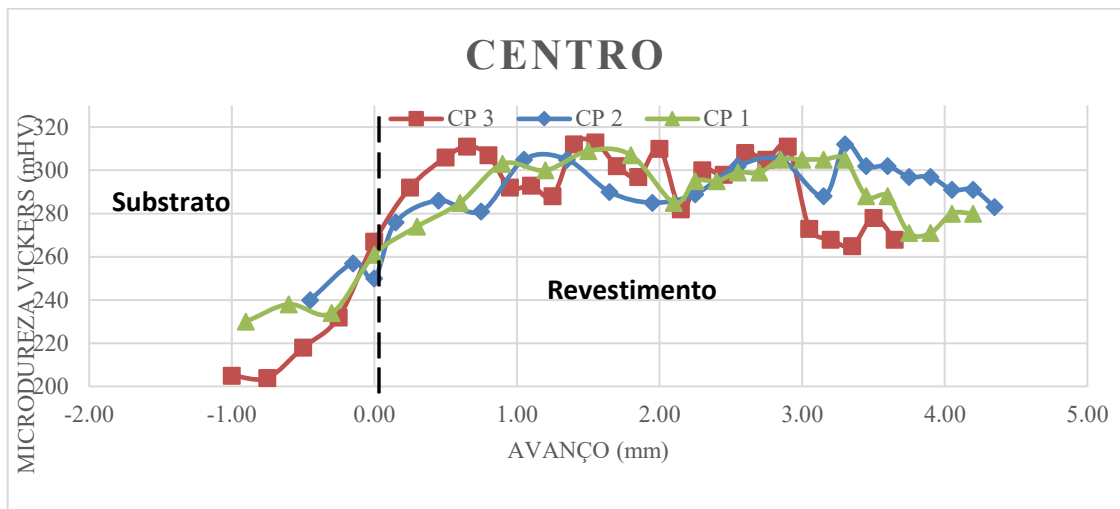
Fonte: O autor.

No entanto, se constatou a presença de Nb, na composição química fornecida pelo fabricante o material não é mencionado. Embora o componente seja apontado por encontrado em estudos semelhantes como o de Feng *et al* (2017) e Wang *et al* (2016). Cabe ressaltar que o Nb tem o pico próximo do Mo, elemento presente em quantidade significativa no material, e a confusão entre esses picos pode ser fonte de erro na análise espectral.

4.4 MICRODUREZA

O perfil de microdureza transversal do reparo é mostrado na Figura 27. Para todas as amostras a dureza no centro do reparo apresentou valores de aproximadamente 290 HV contra cerca de 230 HV do substrato. Diferente de outros processos de deposição a laser, não é possível verificar um aumento da dureza na zona de transição entre o substrato e a camada depositada, também chamada de Zona Termicamente Afetada (ZTA).

Figura 27: Perfil de microdureza transversal



Fonte: O autor.

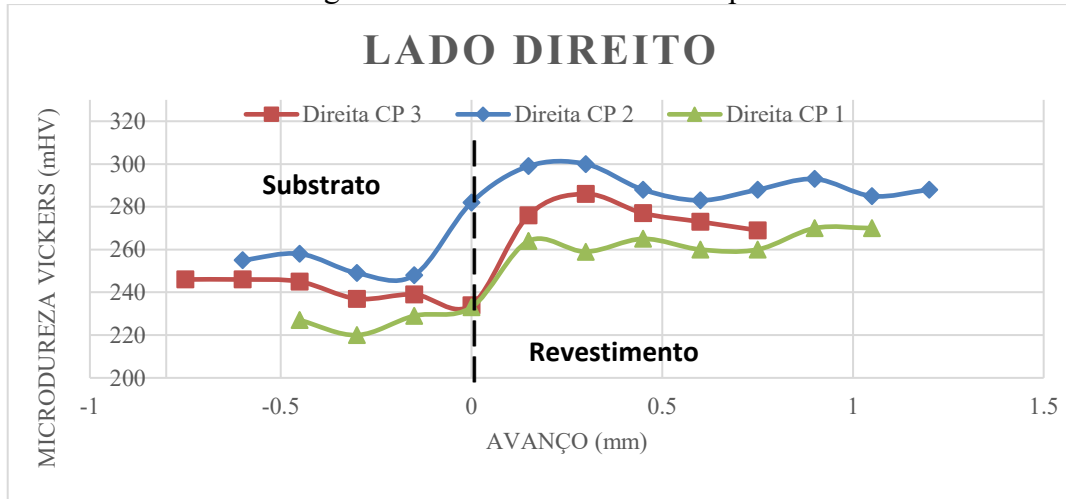
A ZTA geralmente possui uma dureza mais elevada que o núcleo do substrato e, por vezes, que o revestimento, dependendo do material utilizado. Isso acontece devido a transformação de fase do substrato, através do refinamento de grão ou, geralmente formando martensita, aumentando a dureza local. Entretanto, como não tanto o substrato quanto o material depositado tem baixa quantidade de carbono, não há esse tipo de transformação. Tal fato, ajuda a evitar o aparecimento de trincas provenientes do resfriamento e da tensão residual gerada na ZTA.

O perfil de dureza em todos os ângulos de chanfro apresentou resultados semelhantes entre 270 HV e 300 HV. A resistência mecânica da matriz γ pode ser aumentada – até certo ponto, sem precipitação de fase secundária – pelo mecanismo de endurecimento por solução sólida, ou seja, pela substituição aleatória de átomos de Ni por outros elementos, principalmente Co, Cr, Fe e Mo (Reed R. C., 2006). Assim sendo, as variações podem ser causadas pela variação da microestrutura, como o aumento por precipitação de fase secundária.

Foram analisadas também as laterais do reparo, Figura 28, onde as condições de resfriamento entre o substrato e a camada depositada apresentam maior diferenciação, devido a inclinação dos chanfros. Os resultados de dureza obtidos nesta região foram semelhantes ao encontrado na região do centro. Entretanto o CP 1 apresentou dureza cerca de 10 % inferior comparado as outras condições de deposição, para o metal de adição, apresentando um pico próximo a 240 HV na região de interface com substrato. Isso pode ser devido a maior densidade

de fases laves presentes nesse material, que são consideradas deletérias, e reduzem as propriedades mecânicas do material.

Figura 28: Dureza na lateral do reparo



Fonte: O autor.

O pico pode ser decorrente da taxa de resfriamento muito elevada, dando origem à formação de fases intermetálicas mais duras, e microestrutura extremamente refinada na região de dissipação de calor mais rápida. Vale apontar que a segregação de componentes como o Nb e Mo, bem como as condições de resfriamento, são principais fatores determinantes para a dureza do material.

Como as fases do material são fatores determinantes nas propriedades mecânicas dos materiais, é indicado conduzir análises mais aprofundadas, como uma análise de difração de raios-X, para então reconhecer as fases e abordar sua influência nas características mecânicas do material.

5 CONCLUSÃO

As avaliações experimentais foram conduzidas com reparo para diferentes ângulos de chanfro, método usado para reparo de regiões desgastadas em diversos componentes de engenharia. O principal objetivo com esse tipo de processo, é reduzir o custo das empresas com reparo de componentes, através da utilização de uma técnica de deposição a laser, que reduza tensões residuais e possibilidade de trincas.

Conclui-se que o processo de reparo via laser *cladding*, é eficaz no reparo de componentes danificados, formando uma região de deposição integrada, com menos irregularidades, poros e trincas que processos convencionais de soldagem a arco.

Em relação ao objetivo inicial de avaliar a distorção, se constatou que: as distorções máximas em módulos foram inferiores a 1 mm. Com uma relação aproximadamente linear entre a distorção e a quantidade de energia fornecida aos substratos.

A distorção na direção y se mostrou mais proeminente. Foi possível notar que os parâmetros que influenciam a distorção estão acoplados entre si. De forma que, para prever o efeito de distorção, seria necessário considerar parâmetros como: a variação da inércia do substrato, condições de pré-aquecimentos do substrato, varrer faixas de interesse dos parâmetros com intuito de criar um modelo matemático.

Com relação as avaliações de descontinuidade do material, foi constatado que a densidade média foi superior a 99,5%, para todas as condições de chanfro. Sendo que, existe um aumento de falta de fusão, na região de adesão lateral para os ângulos de chanfro mais agudos. Considerando que esse tipo de defeito pode ser concentrador de tensão, é indicado que se aplique, pelo menos chanfro 3 (150°) para processos de reparo a laser. Possíveis formas de mitigar esses tipos de defeito são aumentar a densidade de energia na região de união, diminuir a vazão pó ou ainda usar de pré-aquecimento dos substratos.

A maior incidência de calor em ângulos mais obtusos de substrato, impõem uma área fundida lateral mais evidente, sendo essa decorrência não só da fusão do material, mas da movimentação convectivas do efeito Marangoni da poça de fusão. Essas movimentações promovem diluição do material de base para as camadas seguintes, no entanto por meio da análise química (EDS) não foi constatado Fe na camada medida, indicado que a composição química e, portanto, as propriedades do material de adição foram preservadas.

Ao propor como solução para falta de fusão o aumento da densidade de energia local, é importante ressaltar que, é esperado maiores níveis de distorção. Caso o componente tenha tolerâncias geométrica apertadas, uma abordagem que utilize outra estratégia de deposição deve ser considerada. De forma alternativa ou complementar pode se pré-aquecer o substrato ou a estratégia de deposição.

Pela análise de composição química EDS, foi possível concluir que há presença de Nb na região intermetálica, material não listado pelo fabricante como material presente, embora encontrado em diversos estudos com Inconel 625. O Nb e Mo podem endurecer o material por solução sólida, embora sejam elementos formadores de fases laves. A microestrutura mais refinada, mitiga a redução das propriedades físicas derivadas das fases laves. A dureza da região central, apresentou valores médios na faixa de 290 HV, para todos os CPs medidos. Já a ZTA não apresenta uma elevação considerável da dureza em função da composição química do material ter concentração muito baixas de C.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar pré-aquecimento para reduzir tensões residuais e reduzir falta de fusão nas regiões laterais;
- Criação de um modelo para prever o efeito de distorção, usando maior número de amostra e separar;
- Deposição do reparo com menos camadas, usando um bocal de 5 mm para reduzir o número ciclos térmicos;
- Avaliação tribológica;
- Avaliação de propriedade de corrosão;
- Avaliar outras estratégias de deposição, mudando a orientação de deposição ao subir a camada de deposição.

REFERÊNCIAS

CARBÓ, Hector M. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações**. Arcelor Mittal, [S.l:s:n] p. 29, 2008.

ASTM INTERNATIONAL. **A240/A240M-19: Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications**. West Conshohocken, PA, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1520/A0240_A0240M-19. Acesso em: 17 out. 2020.

BHADESHIA H.; HONEYCOMBE R.; **STEELS: Microstructure and Properties**, 4. ed. Elsevier Ltd, 2017.

BRANDT, M. *et al.* Laser cladding repair of turbine blades in power plants: From research to commercialisation. **International Heat Treatment and Surface Engineering**, v. 3, n. 3, p. 105–114, 2009.

CASATI, R.; LEMKE, J.; VEDANI, M. Microstructure and Fracture Behavior of 316L Austenitic Stainless Steel Produced by Selective Laser Melting. **Journal of Materials Science and Technology**, v. 32, n. 8, p. 738–744, 2016.

CHEN, Yuan *et al.* Characterization of heat affected zone liquation cracking in laser additive manufacturing of Inconel 718. **Mater. Design**. v.90, p. 586–594, 2016.

DING, Yinping. *et al.* Stellite alloy mixture hardfacing via laser cladding for control valve seat sealing surfaces. **Surface and Coatings Technology**, v. 329, p. 97–108, 2017.

FENG, Kai. *et al.* Improved high-temperature hardness and wear resistance of Inconel 625 coatings fabricated by laser cladding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 243, p. 82–91, 2017.

GASSER, A.; KREUTZ, E. W.; WISSENBACH, K. **Physical aspects of surface processing with laser radiation**. SPIE, vol.1020, High Power CO2 Laser Systems and Applications, 343-360, 1988.

HASHIMI S., **Comprehensive Materials Processing**. Elsevier Science. 2014.

HE, W. *et al.* In-situ monitoring and deformation characterization by optical techniques; part I: Laser-aided direct metal deposition for additive manufacturing. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 122, n. April, p. 74–88, 2019.

HEIGEL, J. C.; MICHALERIS, P.; PALMER, T. In situ monitoring and characterization of distortion during laser cladding of Inconel® 625. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 220, p. 135–145, 2015.

INTERNATIONAL CRUISE SHIP INDUSTRY. Robotic laser cladding used to repair engine sealing surfaces. Registered in England & Wales Number 8356111. Disponível em: <https://www.cruise-ship-industry.com/robotic-laser-cladding-used-to-repair-engine-sealing-surfaces/>. Acesso em: 14 maio. 2021.

ION John C.; CENG, F. **Laser Processing of Engineering Materials**. Principle, procedure and industrial application. Elsevier Ltd. p. 1 – 589, 2005.

LAWRENCE, J. **Advances in laser materials processing – Technology, research and applications**. Oxford: Woodhead Publishing Limited, 2010.

LI, Yongzhe. *et al.* Repairing surface defects of metal parts by groove machining and wire + arc based filling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 274, n. 92, p. 116-268, 2019.

MILLS, K. C.; KEENE, B. J.; BROOKS, R. F.; SHIRALI, A.: Marangoni effects in welding. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, p. 911-925 .1998.

MENG, Li *et al.* Effect of laser cladding and laser-induction hybrid cladding coatings on the bending properties and fracture behavior of rails. **Surface & Coatings Technology journal**. v 364. p. 1038-1050. 2019.

NOTON, R. L. **Projetos de Máquina: uma abordagem integrada**. 4 ed. Porto Alegre: Techbooks. 2013

PACHECO, J.T. *et al.* Laser Cladding of Stellite-6 on AISI 316 L Austenitic Stainless Steel: Empirical-Statistical Modeling and Parameter Optimization. **Lasers Manuf. Mater. Process**. v.8, p 1-14. Mar. 2021.

POLLOCK, T. M. *et al.* **Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure, and Properties**. v. 22, n. 2, p. 361–374, 2006.

RAZDOLESCU, A. C. *et al.* **ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and Their Alloys**. [s.l: s.n.]. v. 56 .2002

REED, R. C. **The superalloys: fundamentals and applications**. Cambridge press, 2008.

SCHWEITZER, Luiz Guilherme de Souza. Laser Cladding for Epitaxial Nickel Base Superalloys Turbine Blades. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia

Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2014.

SONG, L. *et al.* Repair of 304 stainless steel by laser cladding with 316L stainless steel powders followed by laser surface alloying with WC powders. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 24, p. 116–124, 2016.

STEEN, W. M.; MAZUMDER, J. *Laser Material Processing*. 4th. ed. London: Springer-Verlag London Limited 2010, 4ed, 2010.

TOYSERKANI, E.; KHAJEPOUR, A.; CORBIN, S. *Laser Cladding*. Boca Raton: CRC Press LLC. 2017.

TUMER M.; KARAHAN T.; MERT T. Evaluation of microstructural and mechanical properties of dissimilar Inconel 625 nickel alloy–UNS S32205 duplex stainless-steel weldment using MIG welding. **Welding in the World**, v. 64, n. 1, p. 21–35, 26 jan. 2020.

VENDRA L, ACHANTA AJ. Metal additive manufacturing in the oil and gas industry. *Solid Freeform Fabrication*. v 7, p. 454-460. 2018.

VELARDE, M. G.; ZEYTOUNIAN, R. K.: *Interfacial Phenomena and the Marangoni Effect*. Courses and Lectures 428. Wien: Springer-Verlag, 2002

WANG J.F.; SUN Q.J.; WANG H.; LIU J.P.; FENG J.C. Effect of location on microstructure and mechanical properties of additive layer manufactured Inconel 625 using gas tungsten arc welding. **Materials Science & Engineering**. v: 676; p.395-405, 2016

WU, Q. *et al.* Residual stresses in wire-arc additive manufacturing – Hierarchy of influential variables. **Additive Manufacturing**, v. 35, n. March p. 101355, out. 2020.

ZANARIN, S. **Laser cladding with powder** - effect of some machining parameters on clad properties. [s.l.] University of Trento, 2015.

APÊNDICE A – Parâmetros avaliados no DoE de definição de parâmetro

Para escolher o parâmetro de deposição se usou os resultados derivados da janela de parâmetro abaixo mostrada.

Tabela 13: Parâmetros avaliados no DoE

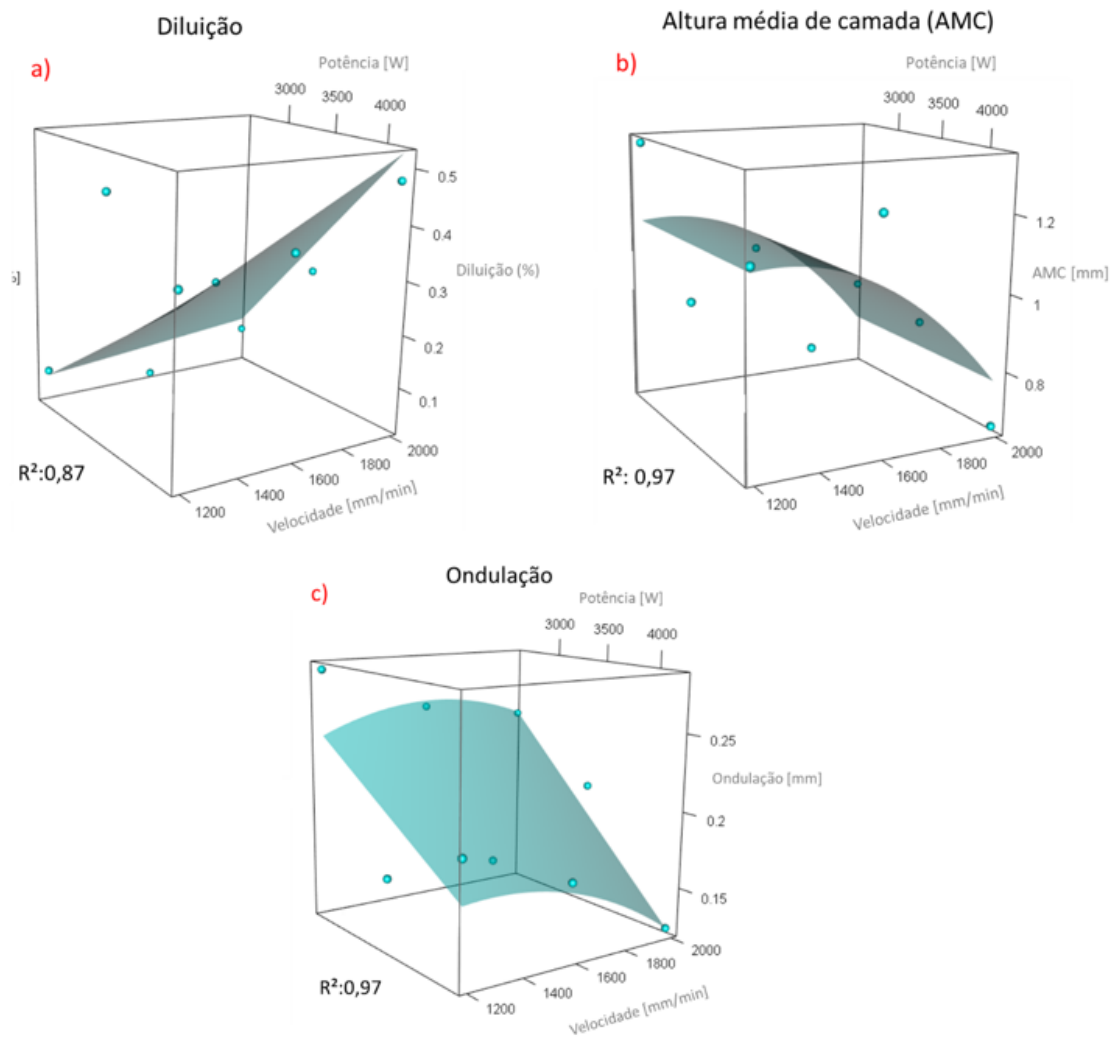
Amostra	Potência [W]	velocidade [mm/min]	Diluição [%]	Ondulação [mm]	Altura de pico [mm]	Porosidade [%]
1	500	400	1,7	0.111	1.136	8.720%
2	500	600	0,6	0.098	0.756	1.970%
3	500	800	4,8	0.083	0.486	0.200%
4	500	1000	3,5	0.070	0.424	0.450%
5	900	400	22,1	0.056	1.421	0.270%
6	900	600	26,0	0.050	0.884	0.290%
7	900	800	30,2	0.054	0.690	0.870%
8	900	1000	33,5	0.036	0.581	0.130%
9	1300	400	30,8	0.048	1.698	0.130%
10	1300	600	39,2	0.051	1.095	0.640%
11	1300	800	48,2	0.062	0.738	2.400%
12	1300	1000	47,8	0.033	0.630	0.640%

Fonte: O autor.

APÊNDICE B – Superfícies de Resposta

As superfícies de resposta para os parâmetros de ondulação, altura e diluição, provenientes do método empírico estatístico baseado em PACHECO (2020) são apresentadas a seguir:

Figura 29: Superfícies de resposta



Fonte: O autor.